

RFID 技术在食品智能包装和供应链追溯中的应用研究

候惠静, 刘秀英*, 王平坪, 张威, 舒在习, 朱力杰

(武汉轻工大学 a.食品科学与工程学院 b.大宗粮油精深加工教育部重点实验室
c.农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430000)

摘要: **目的** 介绍 RFID 技术, 综述其在智能包装、食品供应链追溯的应用进展, 以期为 RFID 技术的发展提供一定的理论基础。**方法** 阐述 RFID 系统的组成、分类、工作原理及该技术的优点; 分析 RFID 技术在监测食品包装内温度、湿度、pH、气体含量等参数的应用潜力; 综述 RFID 技术在整个食品供应链(生产、加工、储运和销售环节)中的追溯进展; 讨论目前 RFID 技术在实际应用中面临的问题和今后的发展方向。**结论** 通过全面综述 RFID 技术在智能包装、食品溯源等方面的应用, 表明 RFID 技术在食品领域具有广泛的应用前景, 这对食品质量控制具有重要的意义。

关键词: 无线射频识别技术 (RFID); 智能包装; 供应链追溯; 食品质量控制

中图分类号: TB484 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)13-0158-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.018

Application of RFID Technology in Food Intelligent Packaging and Supply Chain Traceability

HOU Huijing, LIU Xiuying*, WANG Pingping, ZHANG Wei, SHU Zaixi, ZHU Lijie

(a. College of Food Science and Engineering, b. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education, c. Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products of Hubei Province, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce RFID technology and review the progress of its application in other aspects such as intelligent packaging and food supply chain traceability, with a view to providing a certain theoretical basis for the development of food quality control. The composition, classification, working principle of RFID system and the advantages of this technology were introduced. The potential application of RFID technology for monitoring temperature, humidity, pH, and gas content within food packaging was analyzed. An overview of advances in the traceability of RFID technology throughout the food supply chain (production, processing, storage and distribution) was provided. The problems faced in the practical application of RFID technology and the future direction of development were discussed. Through a comprehensive overview of the application of RFID technology in intelligent packaging, food traceability and other aspects, it shows that RFID technology has a wide range of application prospects in the field of food, which is of great significance to food quality control.

KEY WORDS: radio frequency identification technology (RFID); intelligent packaging; supply chain traceability; food quality control

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 武汉轻工大学科研项目资助 (2024RZ072)

*通信作者

食品质量控制是确保食品质量安全的重要环节, 对保障人体健康具有重要影响。无线射频识别技术 (Radio Frequency Identification, RFID) 作为一种新兴技术已广泛应用于医疗和食品等领域, 其不需要直接接触就可以实现物品的自动识别和数据记录, 还可以与外部数据处理系统连接实现信息的可视化分析^[1]。

近年来, RFID 技术在食品领域中应用的研究已成为热点。通过 RFID 技术与传感器的结合, 能够实现对食品包装内温度、湿度、pH 和气体含量等参数的监测^[2], 这对需要保持特定条件下储存和运输的食品 (如冷冻食品等) 至关重要。此外, 利用 RFID 技术能够帮助实现食品供应链的全过程追溯、提高产品管理效率和确保食品安全^[3]。及时发现食品供应链中的相关问题并采取积极应对措施, 能够有效减少产品损耗和浪费、保障食品的质量、提高生产效率和经济效益、维护消费者权益。

本文系统介绍 RFID 技术, 以及其在食品智能包装和供应链追溯方面的应用。重点介绍 RFID 技术结合温度、湿度、pH、气体监测等方面的应用, 以期 RFID 技术发展提供重要参考。

1 无线射频识别技术简介

无线射频识别技术 (Radio Frequency Identification, RFID), 是一种信息传感技术, 主要通过电磁信号实现信息的非接触式双向传输与识别。二战期间, 同盟国为了解决能见度低等问题, 研发设计了一种基于无线电信号识别的射频识别设备, 这也是全球公认的首例射频识别技术^[4]。而今, 随着物联网技术的不断发展, 基于无线通信的 RFID 技术不需要物理连接和视觉接触就能够工作; 与传统的条形码相比, RFID 标签具有防水、防磁、耐高温、可重复使用以及数据可加密、存储容量大等优势^[5]。因此, RFID 被认为是 21 世纪具有发展潜力的信息技术之一。

1.1 RFID 的系统组成和工作原理

RFID 系统由标签、阅读器和天线^[6]3 个部分组成。

标签 (Tag): 也称应答器, 由芯片和天线经封装而组成。芯片通过唯一的识别码保存特定的编码数据, 天线则是接收和发送电信号的接口^[7], 标签和阅读器之间主要通过反向散射的原理传输信息。

阅读器 (Reader): 阅读器是读取标签信息的设备, 由收发器、解码器以及天线封装而成, 设备分为手持式和固定式。当阅读器靠近标签时, 收发器会向标签发送信号, 激活后的标签接收信号, 并将带有编码信息的信号反馈回阅读器, 信息经解码器处理后即可获取标签信息^[8-10]。有些阅读器还可以通过接口与外部软件系统相连接进行数据的交换。

天线 (Antenna): 天线是标签和阅读器之间的桥梁, 主要起到传递射频信号的作用。用于电磁波的捕获和发射, 其阻抗与标签阻抗相配。

RFID 系统的工作原理并不复杂, 标签和读写器之间主要是通过信号耦合来实现通信, 具体见图 1。

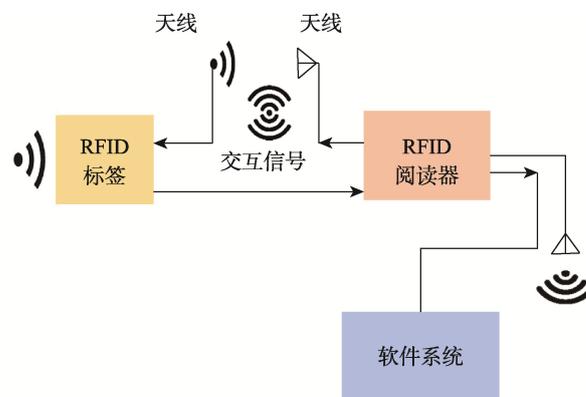


图 1 RFID 系统组成
Fig.1 RFID system composition

标签进入电磁区域后, 接收阅读器发出的射频信号, 无源标签凭借感应电流所获得的能量发送出存储在芯片中的产品信息 (或者有源标签主动发送某一频率的信号); 阅读器通过发射无线电信号, 将能量传输给标签天线, 而标签利用接收到的能量来激活芯片, 并将存储的数据通过调制信号 (改变标签天线的阻抗来实现信息传输) 的方式传回阅读器。

1.2 RFID 标签的分类

1.2.1 标签类型

根据供电方式的不同可以将标签分为有源标签 (Active Tags)、半有源标签 (Semi-Active Tags) 和无源标签 (Passive Tags), 具体见表 1。

有源和半有源标签均内设电源、存储容量较大、发射信号较强、传送速度高, 还可以多标签同时工作, 工作范围从一米到数十米不等。不同的是半有源标签需要收到电磁波的激活之后才能向阅读器发送数据。此外, 标签电源有一定的寿命, 当电源耗尽时则无法正常工作。标签的制作成本较高、体积较大、很难在恶劣环境中生存, 因此适用于资产管理^[11]。无源标签结构简单、内部无电源, 阅读范围和存储容量相对较小。其主要利用 RFID 阅读器产生的电磁场能量进行供电, 并通过反射的方式传输数据, 通常具有体积较小、耐用性强和能够承受恶劣工作环境等特点。在实际应用中该类标签制作成本低、功耗小, 因而更适合大规模无线传感^[12]。

1.2.2 RFID 工作频率

RFID 标签的工作频率决定其工作原理和工作距离, 具体见表 2。

表1 RFID标签的区别
Tab.1 Differences in RFID tags

标签类型	体积	容量	成本	信号强度	工作范围	标签寿命	内部有无 电池	能否主动 发射信号	恶劣环境 承受能力
有源标签	大	大	高	较强	1~10 m	5年左右	有	能	弱
半有源标签	较大	较大	较高	较强	1~10 m	5~10年	有	不能	弱
无源标签	小	小	较低	较弱	小范围	10年左右	没有	不能	较强

表2 标签工作频率
Tab.2 Label working frequency

类别	频段	工作方式	识别范围	传输速度	电磁波穿透能力	应用场景
低频 (LF)	124~134 kHz	电感耦合	< 20 cm	慢	强	门禁管理、动物追踪
高频 (HF)	6~13.56 MHz	电感耦合	< 1.5 m	较快	较强	身份验证、图书管理
超高频 (UHF)	860~960 MHz	电磁波耦合	3~10 m	快	较弱	供应链管理、仓储物流
微波 (SHF)	2.45 GHz	电磁波耦合	几十米不等	非常快	与环境条件有关	交通管制、高速读卡

低频段和高频段的RFID标签均通过电感耦合的方式工作,但高频段的传播速度更快、识别范围更大。低频段发射的电磁波穿透能力较强,能够穿透水,可以应用于液体和人体组织等^[13]。高频段的电磁波能穿透有损材料和其他电介质,但与低频一样均不能穿透金属^[14]。超高频段利用电磁辐射的空间耦合实现信息的识别和传输,读取范围更远,通常可以达到3~10 m,数据传输速度快^[15-16]。微波射频段的电磁波通过反向耦合的形式实现能量与信息的交互和传递^[17]。其信号传输速度非常快,识别范围可达到几十米甚至上百米^[18],且识别方向性好。

1.3 RFID技术的优点

RFID技术主要有以下几个优点。

- 1) 非接触式识别。RFID标签不需要物理接触,无线电波即可实现信息传输,识别过程更便捷。
- 2) 抗干扰性强。RFID标签体积小、耐用性强、适应于多种工作环境。
- 3) 识别高效。RFID技术能够实现数据的快速读写和处理,在大规模物品的识别和跟踪方面表现出高效性。
- 4) 安全性高。RFID标签可以通过各种形式附着在产品上,还可以对其进行加密保护,因此能够提高数据的安全性。
- 5) 自动化程度高。自动化的数据采集和处理有效减少了人工操作的需求,提高了工作效率。正是RFID技术的诸多优点,使其在食品智能包装和供应链追溯中的应用更加广泛。

2 RFID技术在食品智能包装中的应用

食品包装能够有效避免食品与外部环境的直接接触、减少食品劣变的风险。单以保质期衡量包装食

品的品质并不太准确,通过结合传感技术能够更加高效、准确地监测食品包装中相关指标的变化^[19],具体见图2。

纳米材料、聚乙烯醇(PVA)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚苯胺(PANI)等敏感材料可以通过涂敷或集成等方式结合到RFID标签上,制作不同的智能传感器。环境中温度、湿度、pH、气体含量的变化能够影响标签的阻抗,因此,这些指标能够间接指示食品新鲜度^[20-21]。

2.1 温度监控

易腐食品储运过程中极易受到温度的影响而发生质量问题,有研究表明由于温度管控不当而使食品腐败变质的比例高达35%^[22]。

2020年,Vivaldi等^[23]用掺杂铜离子的液体作为温度智能材料,根据其熔点特性制作RFID温度传感器。将铜滴在电极之间,当环境温度上升8℃以上时,离子液滴融化并与电极接触使RFID标签电路发生短路,从而达到温度监测的目的。RFID传感器的实际应用环境较复杂。Shafiq等^[24]用对冷温度响应的形状记忆聚合物或液晶弹性体(Liquid Crystal Elastomers, LCEs)制作温度传感器,通过研究发现该传感器有较好的重复性且能够监测低温度下冷链食品的温度阈值。2023年,陶佰睿等^[25]以微带贴片天线作为传感器衬底,ZnO/RGO双层纳米复合材料为温敏材料,制作了一种基于ZnO/RGO纳米材料的无源RFID温度传感器,外界温度的升高能够使复合材料介电常数发生改变,进而影响RFID传感器参数的改变,该传感器在温度10~60℃的灵敏度可达0.86 dB/℃。

基于金属氧化物、纳米复合材料等温敏材料制成的RFID温度传感器,在传输距离、数据读取等方面有一定潜力,未来还需要对灵敏度、重复性等方面进行深入研究,使其得到更广泛应用。

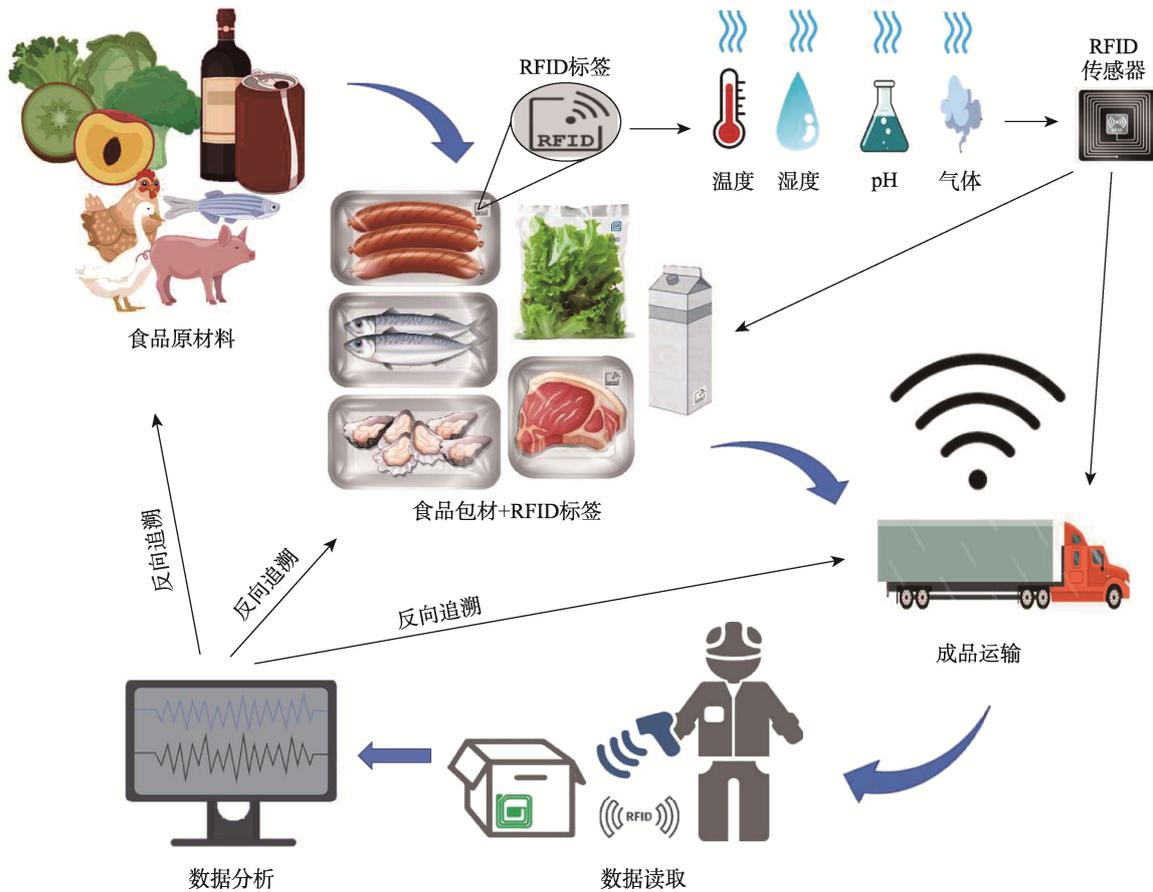


图 2 RFID 技术在食品溯源、智能包装中的应用

Fig.2 Application of RFID technology in food traceability and intelligent packaging

2.2 湿度监控

聚乙烯醇 (PVA) 是一种无色、无味、生物可降解的有机聚合物, 其分子表面的羟基容易与水形成氢键, 因此可以作为良好的湿敏材料。王博等^[26]以聚乙烯醇薄膜为湿度敏感材料设计湿度传感器, 在相对湿度为 21.9%~52.5% 的条件下研究发现, 随着环境相对湿度的升高, 该传感器谐振频率逐渐下降, 且平均灵敏度可达 23.08 MHz/% RH。聚酰亚胺 (PI) 的介电常数对湿度非常敏感, 也常被用作湿敏材料^[27]。此外, 氧化石墨烯 (GO) 有大量的含氧官能团, 能够和水分子相互作用, 通过对氧化石墨烯和金属氧化物的研究发现, 以 SnO_2/GO 为湿敏材料的 RFID 湿度传感器灵敏度可以达到 2.95 MHz/% RH, 这表明了氧化石墨烯在湿度监测方面的潜力^[28]。

传感器的灵敏性除了与湿敏材料有关以外还与传感器的结构、形状等相关。Deng 等^[29]用硅纳米线沉积层作为敏感材料, 设计湿度传感器结构为 L 型槽, 经测试发现该传感器标签具有良好的滞后性和一致性。2023 年, 王张磊等^[30]用导电碳浆在聚酰亚胺 (PI) 膜上打印叉指电极型湿度传感器, 在相对湿度为 30%~90% 内研究相邻叉指间隙 D , 发现 $D=0.25$ mm 时, 传感器的电容变化率增加了 2 649.1%。同年,

Xue 等^[31]将装载氧化石墨烯 (GO) 的传感器喷印到双铜版纸, 通过改进谐振器结构, 改善了纸基无芯片 RFID 湿度传感器灵敏度低的问题, 后经仿真实验发现增加氧化石墨烯 (GO) 浓度能够提高该传感器的灵敏度。

2.3 pH 监控

蛋白质含量丰富的食品容易发生腐败变质而使食品本身或外部酸碱度发生变化, 通过监测 pH 值能够间接反应食品质量^[32]。

2017 年, Hillier 团队^[33]以柔性聚合物为基板, 将交联的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜集成到 RFID 标签上, 制作了一种工作频率为 865.6~867.6 MHz 的无源 UHF RFID pH 传感器; 当 PDMS 聚合物交联不充分时, 多余的 NH_2 基团可以与质子相互作用形成 NH_3^+ 基团, 引起电极电容的改变, 因此该传感器在 pH 为 7.2~8.8 时有较强响应。壳聚糖是一种无色、无味、无毒的天然多糖, 能够与酸性/碱性介质作用。2020 年, Athauda 等^[34]以壳聚糖、聚乙二醇 (PEG)、乙酸制成的水凝胶为敏感材料, 制作一种在 3~7 GHz 频段下工作的无芯片 RFID pH 传感器, 该传感器主要通过水凝胶物理特性的变化表征传感器频率, 不同的是该传感器对高 pH 和低 pH 条件同样敏感, 可监

测的范围从 pH=4 到 pH=10。此外, Waimin 等^[35]设计的低成本无源 pH 传感器不仅能够监测包装肉类新鲜度, 且使用的所有组件均具有生物相容性, 这为 RFID 传感器向绿色、安全方向的发展提供新思路。

2.4 气体监控

大多数食品中的氨基酸在氨基酸脱羧酶的作用下发生脱羧反应, 产生的挥发性胺和生物胺影响食品新鲜度。将柔性聚苯胺 (PANI) 薄膜沉积在叉指电极上制成氨气传感器, 可以检测肉类食品包装中的氨气含量。PANI 与氨能够发生氧化还原反应, 且随着氨气浓度的增加 PANI 薄膜的导电性呈线性增加, 40 s 就能够快速响应体积分数为 0.005%~0.15%的氨气^[36]。

蛋白质含量高的食品在腐败变质时常伴随着 H₂S 等气体的产生, 可以通过比较海鱼在室温和冰箱 2 种不同环境下产生的 H₂S、NH₃ 气体浓度评估鱼的新鲜度^[37]。2023 年, 任欢^[38]根据不同时期释放出的气体成分影响标签的电磁响应原理, 设计制作无芯片 RFID 传感器, 经过对香蕉、西红柿、猕猴桃 3 种不同种类的果蔬进行测试发现, 标签对香蕉水果品质状态的识别性较好, 西红柿品质状态的谐振响应较弱, 而对猕猴桃在成熟期的谐振响应最明显, 因此可用作果蔬品质状态分析和判别的依据。这些气体传感器能够通过监测食品包装环境中的气体, 降低食品变质的风险, 从而确保食品的质量和安

全。综上, 设计制作用于不同指标监测的 RFID 传感器, 可以间接指示食品包装内温度、湿度、pH、气体含量等的变化, 实现食品的质量安全控制。目前不少学者致力于绿色、安全、生物可降解的传感器材料的研究^[39], 植物油^[40]、谷朊粉^[41]等已被研究用于 RFID 智能传感器的制作; 此外, 食品储运过程中的环境通常较复杂, 通过对 RFID 系统布置、天线位置进行优化^[42-43], 可以设计多指标融合的智能传感器, 这种多指标监测的 RFID 传感器将是未来的一个发展方向。

3 RFID 技术在食品供应链追溯中的应用

食品溯源主要通过对食品原料生产、食品加工、仓储运输以及销售过程中有关食品质量相关信息进行记录, 使信息能够被正向或逆向地跟踪, 实现食品的质量控制、保障食品的安全和质量, 具体见图 3。

3.1 食品生产环节

利用 RFID 技术作为数据载体, 可以在食品的生产环节对产品原产地、批次号、生产日期、入库信息等基本信息进行记录^[44]。

将植入信息的 RFID 电子标签制成动物耳标、脚环等形式, 不仅能够避免标记对动物皮毛的污损, 还

能减少标记物丢失的风险^[45-46]; 水产品 (鱼虾等) 在养殖过程中, 需要对产品种类、饲喂配方、养殖环境、检疫情况等信息通过个体进行标识^[47]; 此外, 种植类食品对生长环境的要求较高, 因此 RFID 电子标签中还需要包含种植时间、施肥信息、农药使用信息、生长环境、光照和降雨量等信息。食品生产是整个供应链的源头环节, 也是实现从“农田”到“餐桌”全过程可追溯性的关键环节。

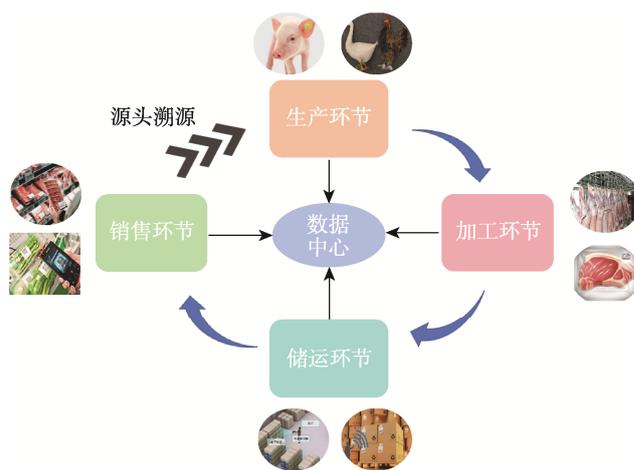


图3 食品供应链流程
Fig.3 Food supply chain process

3.2 食品加工环节

食品原材料到达加工环节后需要对 RFID 电子标签内的信息进行识别, 为确保食品的安全需要根据加工工艺的不同对原材料进行检验, 只有检验合格的产品才能够进行加工环节。肉制品在屠宰分割后需要按照肉的等级进行分装并及时更新标签, 更新后的标签内容包括原标签信息以及新增的宰杀时间、地点、宰后质量等相关信息, 这些新的信息一经写入将不能修改, 且会随着胴体肉一起进入下一个环节。RFID 技术通过与区块链技术的结合, 能够加强供应链各个环节之间的相互联通、提高食品追溯的效率、促进智能监测的发展^[48]。

3.3 食品储运环节

食品在储运环节除了需要实时掌握环境的变化以外, 还需要完整的记录产品数量、品种、贮藏条件、出入库时间、运输方式、运输条件等相关信息。在仓库或运输车辆上安装 RFID 阅读器, 通过对产品包装上 RFID 标签的识别, 能够快速掌握产品的出入库信息, 从而达到协助管理人员对仓库产品高效盘点的效果^[49]; 此外, 基于 RFID 技术设计的传感器还可以对储运环境中温度、湿度等相关参数进行监测, 确保产品在储运环节的质量安全, 从而为消费者提供全面、准确的信息。

3.4 食品销售环节

成品到达不同的销售地点之后, 销售商通过 RFID 阅读器读取电子标签中有关产品生产、加工、储运环节的所有信息, 然后按照商品类别、货架期、贮藏条件等对产品进行分类销售。还可以在食品货架上安装固定阅读器, 通过读取产品标签来获取信息, 从而实现产品数量盘点和环境监测^[50]。此外, 消费者还可以通过手机端实现产品信息的查询。当某个产品出现问题的时候能够快速查找食品源头, 并在必要时进行产品召回处理。

4 展望

RFID 技术在食品智能包装、食品供应链追溯中的应用已有不少研究, 但目前, 大部分研究都还停留在实验室阶段, 要想实现 RFID 技术的大规模商业化应用可以从以下方面考虑:

1) 目前, RFID 技术在不同国家、地区、企业有其不同的参考标准, 这就导致信息的采集、存储和共享存在一定障碍。未来需要不断完善相关标准和法则, 使 RFID 系统能够适应各区域之间信息的共享和集成。

2) 有效的管理、分析和利用数据信息对 RFID 技术的发展至关重要。区块链技术能够实现供应链的去中心化, 借助区块链建立全面的数据管理和分析平台能够简化信息的管理, 能够使食品供应链管理变得更加透明化^[51], 通过从海量信息中抓取有用信息, 能够帮助企业优化供应链的管理和决策。

3) 随着市场竞争和技术的进步, RFID 标签成本正在不断的下降, 但这仍是一个需要关注的问题。提高标签综合性能, 简化标签结构在一定程度上为降低标签成本提供一定思路。

5 结语

随着智能传感技术的不断发展, 绿色、安全、可降解的传感材料, 更符合 RFID 传感器在食品领域的发展; 此外, 多指标融合的智能传感器, 不仅能够为 RFID 技术带来增值价值, 还有益于 RFID 技术向更加多元化的方向发展。基于 RFID 技术的传感器在智能材料、生产成本、稳定性等方面仍有较大的进步空间, 虽然 RFID 技术的发展仍面临着许多挑战, 但其在监测包装食品新鲜度、供应链追溯等食品领域已显现出巨大的潜力, RFID 技术在食品领域的应用将有利于提高生产效率、减少食品浪费、增强消费者对食品质量的信心。

参考文献:

[1] ROH S, NGUYEN T D, LEE J S. Applications of Na-

- nomaterials in RFID Wireless Sensor Components[J]. Applied Sciences, 2024, 14(3): 1216.
- [2] ZUO J, FENG J, GAMEIRO M G, et al. RFID-Based Sensing in Smart Packaging for Food Applications: A Review[J]. Future Foods, 2022, 6: 100198.
- [3] RAHMAN L F, ALAM L, MARUFUZZAMAN M, et al. Traceability of Sustainability and Safety in Fishery Supply Chain Management Systems Using Radio Frequency Identification Technology[J]. Foods, 2021, 10(10): 2265.
- [4] 射频世界编辑. RFID 技术与条码技术的比较[J]. 射频世界, 2010, 5(3): 72-76.
- RF World Editor. Comparison between RFID and Barcode[J]. RF World, 2010, 5(3): 72-76.
- [5] 胡敏, 刘波平, 舒令花, 等. 基于 RFID 和二维码的猪肉制品质量安全追溯平台的构建[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 191-193.
- HU M, LIU B P, SHU L H, et al. Construction of Traceability Platform of Pork Product Quality Safety Based on RFID and Two-Dimension Code[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(26): 191-193.
- [6] SONG C, WU Z, GRAY J, et al. An RFID-Powered Multi-Sensing Fusion Industrial IoT System for Food Quality Assessment and Sensing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(1): 337-348.
- [7] SHAN H, PETERSON III J, HATHORN S, et al. The RFID Connection: RFID Technology for Sensing and the Internet of Things[J]. IEEE Microwave Magazine, 2018, 19(7): 63-79.
- [8] MAIA V C, OLIVEIRA K M, KOLSKI C, et al. Using RFID in the Engineering of Interactive Software Systems: A Systematic Mapping[J]. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 2023, 7: 1-37.
- [9] 金佳骏, 钱松荣. 多天线低频大功率 RFID 读卡器设计与实现[J]. 微型电脑应用, 2015, 31(11): 45-47.
- JIN J J, QIAN S R. Design and Implement of Multi-Antenna High Power LF RFID Reader[J]. Microcomputer Applications, 2015, 31(11): 45-47.
- [10] AHMADIHAJI A, IZQUIERDO R, SHIH A. From Chip-Based to Chipless RFID Sensors: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(11): 11356-11373.
- [11] KHAN S I, RAY B R, KARMAKAR N C. RFID Localization in Construction with IoT and Security Integration[J]. Automation in Construction, 2024, 159: 105249.
- [12] ALSHARIF M H, JAHID A, KELECHI A H, et al. Green IoT: A Review and Future Research Directions[J]. Symmetry, 2023, 15(3): 757.
- [13] 孔令荣, 杨跃胜. 远距离无源低频 RFID 电子标签天线设计[J]. 信息技术与信息化, 2020(1): 81-83.

- KONG L R, YANG Y S. Antenna Design of Long-Distance Passive Low-Frequency RFID Tags[J]. *Information Technology and Informatization*, 2020(1): 81-83.
- [14] SAKONKANAPONG A, PHONGCHAROENPANICH C. Near-Field HF-RFID and CMA-Based Circularly Polarized Far-Field UHF-RFID Integrated Tag Antenna[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020, 2020: 1-15.
- [15] SAGGIN B, PODLECKI J, VENA A, et al. Food Spoilage Estimation Using a Sensing RFID Tag[C]// 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC). Gran Canaria, 2022: 1-4.
- [16] QIAO J P, HAO M H, GUO M C. Design of Meat Product Safety Information Chain Traceability System Based on UHF RFID[J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3372.
- [17] SHI G, SHEN X, HE Y, et al. Passive Wireless Detection for Ammonia Based on 2.4 GHz Square Carbon Nanotube-Loaded Chipless RFID-Inspired Tag[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-12.
- [18] 吕荫润, 郑丽敏. 射频识别技术应用于畜产品追溯系统研究进展[J]. *肉类研究*, 2013, 27(5): 26-30.
- LYU Y R, ZHENG L M. Recent Applications of RFID in Livestock Traceability System[J]. *Meat Research*, 2013, 27(5): 26-30.
- [19] 卢敬锐, 石佳子, 刘晨, 等. 面向物联网食品货架期监测智能包装研究进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(19): 58-66.
- LU J R, SHI J Z, LIU C, et al. Research Progress of Intelligent Packaging for Food Shelf Life Monitoring on the Internet[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(19): 58-66.
- [20] 梁勇军. 智能包装技术的研究及应用发展[J]. *印刷工业*, 2023, 18(5): 29-32.
- LIANG Y J. Research and Application Development of Intelligent Packaging Technology[J]. *Printing Industry*, 2023, 18(5): 29-32.
- [21] 李涵瑜, 孙飞龙, 罗如梦, 等. 智能包装的发展及应用[J]. *现代农业装备*, 2023, 44(4): 19-24.
- LI H Y, SUN F L, LUO R M, et al. Development and Application of Intelligent Packaging[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2023, 44(4): 19-24.
- [22] GÖRANSSON M, NILSSON F, JEVINGER Å. Temperature Performance and Food Shelf-Life Accuracy in Cold Food Supply Chains-Insights from Multiple Field Studies[J]. *Food Control*, 2018, 86: 332-341.
- [23] VIVALDI F, MELAI B, BONINI A, et al. A Temperature-Sensitive RFID Tag for the Identification of Cold Chain Failures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112182.
- [24] SHAFIQ Y, GIBSON J S, KIM H, et al. A Reusable Battery-Free RFID Temperature Sensor[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6612-6626.
- [25] 陶佰睿, 韩月, 田朋博, 等. 基于纳米材料的无源 RFID 温度传感器设计[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(7): 1011-1016.
- TAO B R, HAN Y, TIAN P B, et al. Design of Passive RFID Temperature Sensor Based on Nanomaterials[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(7): 1011-1016.
- [26] 王博, 李有为, 王柯. 基于无芯片 RFID 的低成本湿度传感器设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(3): 1047-1052.
- WANG B, LI Y W, WANG K. Low-Cost Humidity Sensor Design Based on Chipless RFID[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(3): 1047-1052.
- [27] LUO M X, LIU Z M, LI Z J, et al. Patterned Ag/PI RFID Tag Integrated with Humidity Sensing by in Situ Metallization[J]. *Langmuir*, 2022, 38(37): 11478-11485.
- [28] TAO B R, FENG L P, MIAO F J, et al. High Sensitivity Chipless RFID Humidity Sensor Tags Are Based on SnO₂/G Nanomaterials[J]. *Vacuum*, 2022, 202: 111126.
- [29] DENG F M, HE Y G, LI B, et al. Design of a Slotted Chipless RFID Humidity Sensor Tag[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 264: 255-262.
- [30] 王张磊, 于培师, 郭志洋, 等. 直书写打印的生鲜品质监测用温/湿度传感器[J]. *轻工机械*, 2023, 41(1): 74-78.
- WANG Z L, YU P S, GUO Z Y, et al. Direct-Ink-Writing Printed Temperature/Humidity Sensor for Monitoring Quality of Fresh[J]. *Light Industry Machinery*, 2023, 41(1): 74-78.
- [31] XUE Y B, HOU B J, WANG S, et al. A Highly Sensitive Paper-Based Chipless RFID Humidity Sensor Based on Graphene Oxide[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 358: 114457.
- [32] 王纪鹏, 魏有婕, 韩毅, 等. pH 敏感性材料在智能食品包装中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 48-55.
- WANG J P, GUO Y J, HAN Y, et al. Application Progress of PH-Sensitive Materials in Smart Food Packaging[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 48-55.
- [33] HILLIER A, MAKAROVAITE V, HOLDER S J, et al. A

- Passive UHF RFID pH Sensor (Smart Polymers for Wireless Medical Sensing Devices)[C]// Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2017). Loughbrough, 2017: 1-2.
- [34] ATHAUDA T, BANERJEE P C, KARMAKAR N C. Microwave Characterization of Chitosan Hydrogel and Its Use as a Wireless pH Sensor in Smart Packaging Applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 8990-8996.
- [35] WAIMIN J, GOPALAKRISHNAN S, HEREDIA-RIVERA U, et al. Low-Cost Nonreversible Electronic-Free Wireless pH Sensor for Spoilage Detection in Packaged Meat Products[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40): 45752-45764.
- [36] MATINDOUST S, FARZI A, BAGHAEI NEJAD M, et al. Ammonia Gas Sensor Based on Flexible Polyaniline Films for Rapid Detection of Spoilage in Protein-Rich Foods[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(11): 7760-7768.
- [37] CHUNG W Y, LE G T, TRAN T V, et al. Novel Proximal Fish Freshness Monitoring Using Batteryless Smart Sensor Tag[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 248: 910-916.
- [38] 任欢. 面向果蔬品质状态检测的无芯片射频跨域感知研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- REN H. Research on Chipless RF Cross-Domain Sensing for Fruit and Vegetable Quality State Detection[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023.
- [39] ALAM A U, RATHI P, BESHAI H, et al. Fruit Quality Monitoring with Smart Packaging[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1509.
- [40] ATHAUDA T, BHATTACHARYYA R, KARMAKAR N, et al. Electromagnetic Characterization of a Food Safe, Organic Smart Material for Customizable Temperature Threshold Sensing in Cold Chain Applications[C]// 2019 IEEE International Conference on RFID (RFID). Phoenix, AZ, 2019: 1-6.
- [41] SAGGIN B, BELAIZI Y, VENA A, et al. A Flexible Biopolymer Based UHF RFID-sensor for Food Quality Monitoring[C]// 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Pisa, 2019: 484-487.
- [42] RADZI A S M, KAMARUDIN L M, MOHAMED L, et al. Novel Approach Using Passive UHF RFID for Grain Moisture Detection[C]// *Control, Instrumentation and Mechatronics: Theory and Practice*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 650-661.
- [43] AZMI N, KAMARUDIN L M, MOHAMED L, et al. Relative Localization Method of Wet Spot of Grain Using Array of Passive RFID Tags[C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021: 012004.
- [44] 曲爱玲, 刘红梅, 马长路. RFID技术在食品追溯中的应用[J]. *农产品加工*, 2020(8): 86-88.
- QU A L, LIU H M, MA C L. Application of RFID Technology in Food Traceability System[J]. *Farm Products Processing*, 2020(8): 86-88.
- [45] 张晶声, 张旭, 金闻名, 等. 射频识别技术在牲畜电子耳标检测上的运用[J]. *中国兽药杂志*, 2022, 56(6): 39-43.
- ZHANG J S, ZHANG X, JIN W M, et al. RFID in Livestock Electronic Ear Tag Test[J]. *Chinese Journal of Veterinary Drug*, 2022, 56(6): 39-43.
- [46] 杨亮, 王辉, 陈睿鹏, 等. 畜禽个体身份标识技术发展进程与展望[J]. *猪业科学*, 2023, 40(9): 24-27.
- YANG L, WANG H, CHEN R P, et al. Development Process and Prospect of Individual Identification Technology for Livestock and Poultry[J]. *Swine Industry Science*, 2023, 40(9): 24-27.
- [47] 林志荣. RFID技术在水产品物流溯源体系中的应用[J]. *现代食品*, 2023, 29(19): 97-99.
- LIN Z R. The Application of RFID Technology in the Traceability System for Aquatic Products[J]. *Modern Food*, 2023, 29(19): 97-99.
- [48] 刘宗妹. “区块链+射频识别技术”赋能食品溯源平台研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(9): 102-107.
- LIU Z M. Research On "Blockchain + RFID" Enabling Food Traceability Platform[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(9): 102-107.
- [49] OCCHIUZZI C, CAMERA F, D'ORAZIO M, et al. Automatic Monitoring of Fruit Ripening Rooms by UHF RFID Sensor Network and Machine Learning[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2022, 6: 649-659.
- [50] 佚名. RFID在生鲜食品冷链物流中的应用模式[J]. *中国果菜*, 2013, 33(4): 42-43.
- Anon. Application Mode of RFID in Fresh Food Cold Chain Logistics[J]. *China Fruit and Vegetable*, 2013, 33(4): 42-43.
- [51] WANG L X, HE Y L, WU Z N. Design of a Blockchain-Enabled Traceability System Framework for Food Supply Chains[J]. *Foods*, 2022, 11(5): 744.