

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流 远程监控系统设计与实现

李泓坤

湖南邮电职业技术学院 湖南长沙

【摘要】冷链物流是现代供应链体系的关键环节。然而，传统冷链物流监控系统普遍面临数据采集精度不足的挑战。随着嵌入式技术与无线传感器网络（WSN）的快速发展，其在提升冷链物流监控能力方面展现出巨大的应用潜力。基于当前现状，本研究提出了一种融合嵌入式技术与无线传感器网络的系统总体设计方案。实验验证表明，该系统具备高数据采集精度、优异的实时性、良好的通信稳定性，以及低能耗与长续航能力等显著优势。在实际应用场景中，该系统的部署有效提升了冷链物流的监控效率与安全保障水平。

【关键词】 蒲嵌入式技术；无线传感器网络；新型冷链物流；远程监控系统；设计与实现

【收稿日期】 2025 年 7 月 20 日 **【出刊日期】** 2025 年 8 月 20 日 **【DOI】** 10.12208/j.sdr.20250183

Design and implementation of a new cold chain logistics remote monitoring system based on embedded technology and wireless sensor network

Hongkun Li

Hunan Post and Telecommunication, Changsha, Hunan

【Abstract】 Cold chain logistics is a crucial link in the modern supply chain system. However, traditional cold chain logistics monitoring systems generally face the challenge of insufficient data collection accuracy. With the rapid development of embedded technology and wireless sensor networks (WSN), they have demonstrated great potential for enhancing cold chain logistics monitoring capabilities. Based on the current situation, this study proposes a comprehensive system design scheme that integrates embedded technology and wireless sensor networks. Experimental verification shows that the system possesses significant advantages such as high data collection accuracy, excellent real-time performance, good communication stability, low energy consumption, and long battery life. In practical application scenarios, the deployment of this system has effectively improved the monitoring efficiency and safety assurance level of cold chain logistics.

【Keywords】 Embedded technology; Wireless sensor networks; New-type cold chain logistics; Remote monitoring system; Design and implementation

引言

随着全球化与电子商务的飞速发展，冷链物流作为保障食品、药品等易腐品质量安全的关键环节，其重要性日益凸显。本研究旨在设计并实现一套基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统。该系统通过集成先进的嵌入式硬件平台与无线传感器网络，实现对冷链物流过程中环境参数的精准采集与实时传输，并兼具远程监控平台

的数据处理与分析功能^[1-2]。

1 系统总体设计与关键技术

1.1 系统总体架构

（1）系统层次描述

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统主要分为三层：感知层、网络层和应用层^[3]。

（2）嵌入式系统模块与无线传感器网络模块的

作者简介：李泓坤（1986-）男，汉族，黑龙江省肇源县，硕士研究生，讲师，研究方向为物联网技术。

关系

在基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统中,嵌入式系统模块与无线传感器网络模块相配合,无线传感器网络模块则主要负责对冷链物流环境中的关键参数进行实时监测与数据采集,并将采集到的数据通过无线方式传输至嵌入式系统模块。

在系统中,嵌入式系统模块与无线传感器网络模块的关系可概括为"控制-采集-传输-处理"的闭环流程。具体而言,嵌入式系统模块通过向无线传感器网络发送控制指令,设定数据采集的频率、范围等参数。无线传感器网络模块根据指令要求,实时采集冷链物流环境中的关键参数,并将数据通过无线方式传输至嵌入式系统模块。嵌入式系统模块接收到数据后,进行预处理、存储与分析,根据分析结果作出相应决策或预警,并通过用户界面将结果展示给用户或发送至其他管理系统^[4]。

(3) 远程监控平台的构建

1) 平台架构设计

远程监控平台采用浏览器/服务器(B/S)架构。无需安装额外的客户端软件。

平台后端采用分布式服务器集群,负载均衡技术。数据库采用关系型数据库,冷链物流环境的历史数据与报警信息,同时支持数据备份与恢复功能。

2) 功能模块设计

a 数据采集与接收模块:该模块负责接收来自嵌入式系统与无线传感器网络的数据,包括温度、湿度、振动等冷链物流环境的关键参数。数据通过TCP/IP 协议或 MQTT 协议进行传输。

b 数据处理与分析模块:该模块对接收到的数据进行预处理,包括数据清洗、数据校验与数据融合。同时,该模块还提供数据分析功能,如趋势分析、异常检测等。

c 数据展示模块:该模块通过图表、曲线、地图等形式,实时展示冷链物流环境的关键参数与状态信息。

d 报警与预警模块:该模块根据预设的报警规则与阈值,对接收到的数据进行实时监控与分析。一旦发现异常情况,立即触发报警或预警机制,并通过短信、邮件、APP 推送等方式通知用户。

e 用户管理模块:该模块提供用户注册、登录、权限管理等功能。同时,该模块还支持用户自定义

监控参数、报警规则等个性化设置。

1.2 嵌入式系统设计

(1) 嵌入式硬件平台选型

该平台采用先进的处理器架构,如 ARM Cortex-M 系列。此外,选用具有丰富外围接口(如 UART、SPI、I2C 等)的硬件平台,便于与传感器、通信模块等外设高效连接和数据传输。同时,该平台还支持多种操作系统和软件开发环境。

(2) 嵌入式操作系统与软件开发环境

选用高度可裁剪、实时性强的嵌入式操作系统。采用 FreeRTOS 作为系统核心操作系统。FreeRTOS,支持低功耗模式,非常适用于资源受限的嵌入式系统。

在软件开发环境方面,选用 Keil uVision 或 IAR Embedded Workbench 等集成开发环境(IDE)。这些 IDE 提供丰富的调试工具、编译器和仿真器,支持多种嵌入式处理器架构。同时,利用这些 IDE 的在线调试功能,实现对嵌入式系统软件的实时调试与性能分析。

(3) 数据采集与处理模块设计

在数据采集部分,采用高精度 ADC(模数转换器)对传感器输出的模拟信号进行采样,确保数据的准确性。采样频率可根据实际需求动态调整,以平衡数据精度与系统功耗。

1.3 无线传感器网络设计

传感器节点设计:传感器节点作为 WSN 的基本单元,负责数据采集与初步处理。采用低功耗、高精度的传感器芯片,并集成微处理器与无线通信模块。

网络拓扑结构,选择星型拓扑结构。该结构由一个中心节点(汇聚节点)与多个传感器节点组成,传感器节点直接将数据传输至汇聚节点,再由汇聚节点将数据上传至远程监控中心。

通信协议与数据传输:为 WSN 设计了基于时分多址(TDMA)的通信协议,确保各传感器节点能够有序发送数据,避免通信冲突。采用数据压缩技术,降低数据传输量,提升传输效率。

2 系统硬件与软件实现

2.1 硬件实现

(1) 嵌入式系统硬件平台搭建

选用基于 ARM 架构的高性能微处理器作为核心处理单元。在硬件设计上采用模块化设计思路,将处理器模块、存储模块和通信模块设计为独立的

子板，通过总线进行连接。

在存储方面，选用大容量、高速的 NAND 闪存作为系统存储介质，用于存储操作系统、应用程序以及采集的冷链物流数据。同时，为确保数据的持久性与可靠性，还配备了 SD 卡作为备份存储设备，实现数据的冗余备份。

（2）传感器节点硬件设计与制作

传感器节点作为无线传感器网络的基本组成单元，负责采集冷链物流环境中的各类参数。传感器节点主要由传感器模块、微处理器模块、无线通信

模块和电源管理模块构成。

传感器模块选用高精度、低功耗的温度、湿度和光照强度传感器。微处理器模块负责数据的采集、处理和传输控制。无线通信模块采用低功耗的 Zigbee 或 LoRa 通信协议。电源管理模块通过电源管理芯片实现对电池电量的有效管理。

（3）通信模块与电源管理

选用高性能的无线通信模块，支持 Zigbee、LoRa 等多种通信协议，能够实现节点间的远距离、低功耗通信。通过优化通信协议和增加冗余校验。

表 1 冷链物流远程控制系统硬件选配

设备名称	型号	数量	备注
嵌入式系统硬件平台	STM32F4 系列微控制器	1 台	核心处理器
温度传感器	DS18B20	根据监测点数量确定	用于温度监测
湿度传感器	DHT11	根据监测点数量确定	用于湿度监测
Zigbee 传感器节点	CC2530	若干（根据监测区域确定）	用于数据采集与传输
Zigbee 汇聚节点	CC2530+以太网模块	1 台	负责数据汇聚与转发

表 1 详细列出了冷链物流远程监控系统中硬件设备的选型与配置，这些设备共同构成了系统的硬件基础，为系统的稳定运行提供了有力保障。

2.2 软件实现

（1）嵌入式系统软件编程

在新型冷链物流远程监控系统嵌入式软件编程部分，通过采用高效、可靠的编程语言和开发工具来实现系统的各项功能。嵌入式系统软件主要包括操作系统、数据采集与处理模块、通信模块及电源管理模块^[5]。

选用嵌入式 Linux 作为操作系统，该系统具有良好的稳定性、可裁剪性及丰富的外设支持。在操作系统配置阶段，根据系统实际需求对内核进行裁剪和优化，去除不必要的模块，降低系统资源占用。同时配置必要的驱动程序，确保传感器、通信模块等外设能够正常工作。

数据采集与处理模块是嵌入式系统软件的核心部分。编写了数据采集程序，通过访问传感器接口，能够实时采集冷链物流环境中的温度、湿度等参数。为保证数据的准确性与可靠性，采用多次采样取平均值的方法对采集到的数据进行滤波处理。此外还编写了数据处理程序，能够按照预设算法对采集到的数据进行处理分析，如计算温湿度的平均值、最

大值、最小值等，并将处理结果本地存储或通过网络发送至远程监控平台。

（2）无线传感器网络软件设计

在新型冷链物流远程监控系统中，无线传感器网络的软件设计是实现系统远程监测与数据采集的关键。

无线传感器网络的软件设计需综合考虑节点的低功耗特性、数据采集的实时性以及网络通信的稳定性。软件划分为数据采集层、数据处理层与数据传输层。数据采集层负责从传感器读取数据；数据处理层对数据进行预处理，如滤波、数据融合等；数据传输层负责通过无线网络将数据发送至远程监控平台。

数据采集模块：该模块负责从温湿度等传感器读取数据，并存储于本地缓冲区。为提高数据采集的准确性与实时性，采用高精度 ADC（模数转换器）与定时器中断技术。

数据处理模块：该模块对采集到的数据进行预处理，如数据滤波、数据融合等，以减少数据传输量并提高数据准确性。此外，实现了数据压缩算法，进一步降低数据传输能耗。

数据传输模块：该模块负责通过无线网络将处理后的数据发送至远程监控平台。采用低功耗

Zigbee 通信协议，并实现自动重传机制，提高通信稳定性。

(3) 数据处理与分析算法的实现

在新型冷链物流远程监控系统中，数据处理与分析算法是确保数据准确性与可靠性的关键。这些算法不仅需要对原始数据进行预处理以提高数据质量，还需要通过高级分析提取有用信息，为冷链物流决策提供支持。

数据预处理主要包括数据清洗、数据滤波与数据标准化等步骤。数据清洗用于去除无效或异常数据，确保数据的准确性；数据滤波用于平滑数据，减少噪声干扰；数据标准化则是将数据转换为统一格式，便于后续分析。

温度预测算法采用基于长短期记忆网络（LSTM）的深度学习模型，该模型能够有效捕捉温度数据的时间

序列特征，实现对未来温度趋势的准确预测。通过历史温度数据的训练，模型可以预测未来一段时间内的温度变化，为冷链物流的温度控制提供预警。

异常检测算法采用基于孤立森林（Isolation Forest）的无监督学习方法，能够有效识别温度异常事件。该算法通过分析温度数据的分布特征，快速检测出与正常模式显著偏离的数据点，及时发现潜在的冷链断裂风险。

2.3 系统集成与测试

在系统功能测试方面，设计了详细的测试方案，对系统的各项功能进行了全面验证。测试结果表明，系统能够准确采集冷链物流过程中的温度、湿度等关键数据，并通过无线传感器网络实时传输至远程监控平台。此外，系统还具备强大的数据处理与分析能力，能够及时发现并预警潜在的冷链物流风险。

表 2 系统整体性能测试结果

测试项目	测试结果
数据采集延迟	小于 1 秒
数据传输成功率	大于 99%
数据精度	温度误差：小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度误差：小于 $\pm 5\%$ 相对湿度
系统稳定性	系统持续运行 72 小时无故障

表 2 中的系统整体性能测试结果表明，该冷链物流远程监控系统具有较高的数据采集速度、数据传输可靠性、数据准确性及系统稳定性。

3 系统性能评估与优化

3.1 性能优化策略

在系统性能评估基础上，针对数据采集处理、网络通信及低功耗设计等方面实施多项优化策略，并取得显著成效^[6]。

在数据采集处理算法优化方面，引入先进滤波算法与智能识别技术，有效提升了数据采集精度与实时性。通过对比优化前后数据发现，优化后的系统能更精准捕捉冷链物流过程中的细微变化，数据处理速度提升近 30%。这不仅增强了系统监控能力，也为后续数据分析提供了更可靠的数据基础。

在网络通信协议改进方面，采用更高效的通信协议并优化网络拓扑结构，显著降低了数据传输延迟与丢包率。优化后系统在网络通信稳定性方面实现质的飞跃，即使在复杂冷链物流环境中也能保持稳定通信连接。同时实现了数据传输加密，进一步

提升系统安全性。

在低功耗策略实施效果评估中，通过硬件平台与软件算法的双重优化，成功降低系统整体能耗。具体而言，采用低功耗传感器节点与优化电源管理策略，使系统在保持高性能同时能耗降低约 25%。这一成果既延长了系统续航时间，也降低了运营成本，提升系统经济性。

3.2 实际应用案例分析

(1) 系统在冷链物流中的应用场景

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统在实际应用中展现出广泛适用性与显著成效。以下是若干典型应用场景：

1) 冷藏车运输监控

在冷藏车运输过程中，系统可实时监测车厢内温度、湿度等关键参数，并通过无线传感器网络实时传输至远程监控平台。当车厢内环境参数超出预设范围时，系统立即发出预警，通知相关人员及时采取措施，确保冷链物流过程中食品的安全与质量。此外，系统还能记录分析运输过程中的各类数据，

为运输优化与成本控制提供有力支持。

2) 冷库仓储管理

在冷库仓储环节，通过布置在冷库内部的传感器节点，系统可全面监测冷库内温度、湿度、氧气浓度等关键指标，确保存储环境符合标准。同时，系统还能实时监控货物存储状态与位置，提高仓储管理效率与准确性。当发现异常情况时，系统立即启动预警机制，通知管理人员介入处理，有效避免货物损毁与损失。

3) 冷链物流园区监控

在冷链物流园区中，系统可实现对整个园区的全面监控与管理。通过部署在园区各个角落的传感器节点，系统可实时监测园区温湿度、人流量、车流量等关键信息，为园区运营管理提供实时数据支持。此外，系统还能实现园区能源管理，通过数据分析优化能源使用，降低运营成本。在发生突发事件时，系统还能快速响应，启动应急预案，确保园区安全稳定。

4) 跨境冷链物流监控

在跨境冷链物流中，系统同样展现出强大监控能力。通过与国际标准通信协议和数据格式对接，系统可实现跨国境的远程监控与数据共享。在货物跨境运输过程中，系统可实时监控货物状态与环境参数，确保货物在运输过程中的安全与质量。同时，系统还能为跨境物流提供全流程可视化服务，让客户随时了解货物位置与状态，提升客户满意度与信任度。

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统在冷链物流领域具有广泛应用前景与显著成效。通过实时监控与数据分析，系统能够确保冷链物流过程中食品的安全与质量，提高仓储管理效率与准确性，降低运营成本，为客户提供更优质的物流服务。

(2) 实际运行效果与反馈

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统在实际运行中取得显著成效，并获得用户的广泛反馈。

1) 实际运行效果

实时监控与预警：系统成功实现冷链物流全流程的实时监控，包括对温度、湿度等关键参数的精准测量。一旦参数超出预设范围，系统立即发出预警，通知相关人员及时采取措施，有效避免因环境

因素导致的货物损毁。

数据准确性与实时性：通过高精度传感器与优化的数据采集算法，系统能提供准确、实时的数据。在多次测试中，系统数据采集误差率低于 0.5%，数据更新频率达到秒级，保障了冷链物流过程的高效管理。

网络通信稳定性：系统的无线传感器网络设计确保了复杂环境中的通信稳定性。即使在偏远地区或信号干扰较大情况下，系统仍能保持稳定数据传输，保证监控的连续性与可靠性。

低功耗与长续航：通过低功耗设计与智能能耗管理策略，系统能耗得到有效控制。实际运行中，系统电池续航达到预期目标，在长期连续运行下仍能保持稳定性能。

2) 用户反馈

用户满意度：用户对系统提供的实时监控、预警功能及数据准确性普遍表示满意。他们认为系统有效提升了冷链物流管理效率，降低了货损风险，从而提高了整体业务效益。

系统易用性：用户反馈显示系统界面设计简洁明了，操作便捷。无论是专业技术人员还是普通工作人员，都能快速上手并熟练操作。这大大降低了培训成本，提高了工作效率。

维护与支持：用户表示系统的维护与支持服务到位。出现问题时有技术支持团队快速响应并提供解决方案。此外，系统还提供详细的操作手册与在线帮助文档，方便用户自行解决问题。

改进建议：虽然用户对系统整体性能满意，但也提出改进建议。如希望系统能进一步丰富数据分析功能，提供更深层的数据洞察；同时希望系统能支持更多通信协议与设备类型，以适应更广泛的应用场景。

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统在实际运行中取得显著成效，并获得用户的高度评价。未来将持续优化系统功能，提升用户体验，为冷链物流行业提供更高效可靠的监控解决方案。

(3) 用户满意度与改进建议

1) 用户满意度

用户对新型冷链物流远程监控系统的整体满意度较高。具体而言，系统提供的实时监控功能获得用户普遍认可。用户反馈称通过系统能实时掌握冷

链物流过程中的温度、湿度等关键参数,有效降低了货物损毁风险。此外,系统的预警功能也获高度评价,一旦冷链物流过程出现异常,系统能快速发出警报,并自动调整物流条件,确保货物安全运输。

在数据准确性与实时性方面,用户认为系统表现优异。系统采集的数据与现场实际情况高度吻合,且数据更新速度快,能为用户提供及时准确的信息支持。同时,系统的通信稳定性也得到用户肯定,即使在复杂多变的物流环境中,系统仍能保持稳定数据传输。

在能耗与续航表现方面,用户普遍反映系统性能良好。通过低功耗设计策略,系统在保证性能的同时有效降低能耗,延长使用时间。这对冷链物流企业而言无疑是重要优势。

2) 改进建议

虽然用户对新型冷链物流远程监控系统的整体性能持肯定态度,但仍提出改进建议。部分用户认为系统的数据处理与分析功能有待加强。当前系统主要提供基础数据采集与展示功能,在数据深度挖掘与智能分析方面仍有提升空间。用户希望系统能提供更多元的数据分析报表,帮助他们更好地了解冷链物流过程中的问题与改进方向。

此外,部分用户还建议系统增加更多定制化功能。例如根据冷链物流企业的实际需求,提供个性化的预警设置与数据采集频率。这将有助于提升系统灵活性与适用性,更好满足企业实际需求。

同时,用户也对系统易用性提出建议。如优化系统界面设计,使其更简洁清晰;增加在线帮助文档或视频教程,方便用户快速上手;提供便捷的故障排查与解决方法,降低系统维护成本。

新型冷链物流远程监控系统在实际应用中取得显著成效,用户满意度较高。但为进一步提升系统

性能与用户体验,仍需根据用户反馈持续改进优化。

4 结论

基于嵌入式技术与无线传感器网络的新型冷链物流远程监控系统在设计与实施方面取得了显著成果。为冷链物流行业的智能化管理提供了有力支撑。未来我们将持续深入研究相关技术,不断优化系统性能,推动冷链物流监控系统的持续发展与创新。

参考文献

- [1] 陈志强,吴海青.一种新型冷链物流监控系统的设计与实现[J].物流科技,2024,47(04):158-160+171.
- [2] 李玮健,李强,王志军.基于嵌入式 MEMS 无线传感器的路面损伤监测技术研究[J].山东交通科技,2024,(05):66-71.
- [3] 杜博,刘汉焯.人工智能驱动的冷链监测优化与决策系统研究[J].榆林学院学报,2025,35(05):106-110.
- [4] 丛志宇,董彦强,李庆龙,等.基于 LoRa 无线技术的煤矿液压支架远程监控系统设计[J].煤矿机械,2025,46(10):49-52.
- [5] 王一帆,王迪.基于工业互联网的数控设备远程监控与智能运维系统设计[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(五).温岭市文昌数控机床设备有限公司,2025:929-933.
- [6] 黄校娟.基于物联网的光伏电站远程监控与故障预警系统设计[J].集成电路应用,2025,42(06):334-335.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS