

基于物联网的食品冷链物流监控与预警系统设计

杨璐佳

北京云食季餐饮管理有限公司 北京 100000

摘要: 目的: 本文旨在设计并验证一种基于物联网的食品冷链物流监控与预警系统, 通过实时监控运输过程中的温湿度变化, 提升食品冷链运输的安全性和质量保障。方法: 系统采用无线传感器网络(WSN)和长短期记忆网络(LSTM)模型, 对冷链环境中关键温湿度参数进行实时采集与预测。通过实验模拟冷链运输中的不同环境情境, 评估系统在准确率、响应时间、数据传输成功率和能耗等方面的性能。结果: 实验结果表明, 系统的异常检测准确率达到97.5%以上, 响应时间平均控制在10分钟以内, 数据传输成功率保持在98.8%以上, 能耗维持在16.8 mWh左右, 表现出较好的实时性、精确性和低能耗特性。结论: 基于物联网的食品冷链物流监控与预警系统在多个关键指标上具备良好的性能, 为冷链运输提供了有效的监控和预警手段。未来研究中, 进一步优化算法和数据传输路径将有助于提升系统在复杂冷链场景中的实用性。

关键词: 物联网; 冷链物流; 温湿度监控; 异常检测

冷链物流作为保证食品安全的重要一环, 其温度和湿度波动对食品品质有着直接的影响。传统的监控手段很难做到实时准确地监测和报警, 容易造成食品在运输过程中由于环境波动发生变质现象。随着物联网技术的不断进步, 冷链物流监控系统已经实现了智能化的升级。通过运用无线传感器网络、射频识别以及数据传输技术, 该系统能够实时地收集和监控冷链环境的各项参数。本研究设计并实施了一套基于物联网技术的食品冷链监控和预警系统, 该系统利用LSTM模型来预测温度和湿度数据, 并通过实验测试了其在准确性、响应速度、数据传输成功率以及能量消耗方面的卓越性能。

1. 物联网在冷链物流中的应用背景

1.1 冷链物流的概述

冷链物流是将食品, 药品及其他易腐物品在低温环境下存储, 运输及配送, 从而延长食品保质期, 保证质量的物流。在世界范围内对食品安全要求不断提高的大环境下, 冷链物流越发显得重要。传统冷链物流监控手段较为单一, 主要依靠人工操作或者基本温湿度记录装置来实现实时监控与异常响应, 从而面临保证食品质量、降低损耗等问题。

1.2 物联网技术在冷链物流中的重要性

物联网技术飞速发展, 给冷链物流智能化升级带来可能。利用无线传感器网络、射频识别技术、移动通信手段以及云计算技术, 冷链物流系统具备了对冷藏环境进行实时监

测和远程管理的能力。该基于物联网监控系统可以将温湿度, 光照和振动等重要参数的数据自动收集到中央控制系统中, 从而对冷链环境进行综合监控。将物联网技术应用于冷链物流, 不但提高管理效率, 而且显著增强运输中食品的安全性。

1.3 食品冷链物流的温湿度控制要求

食品冷链物流过程中温湿度控制对食品新鲜度有着至关重要的作用。针对不同食品特点, 冷链运输时温度一般需要保持在 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$, 以免微生物迅速生长; 湿度应当适中, 以防止过高的湿度引发霉菌生长或过低的湿度导致脱水现象。对温湿度进行实时监控可以有效地减少食品腐败发生的几率, 进而确保运输环节中食品的质量与安全。

2. 食品冷链物流监控系统设计

2.1 系统总体架构

基于物联网食品冷链物流监控系统包括数据采集, 数据传输, 数据存储与管理, 预警与监控等模块。该系统通过无线传感器网络可对输送过程温湿度, 光照, 振动等信息进行实时采集, 经数据传输模块传输到中央监控系统进行储存与管理。

2.2 数据采集模块

数据采集模块为系统关键部分, 利用温湿度传感器, 光照传感器和振动传感器对冷链运输环境数据进行采集。模块需要满足高灵敏度和低功耗等需求, 以保证传感器在复杂

运输环境下稳定工作和准确采集数据。

2.3 数据传输模块

数据传输模块，负责通过无线网络向数据中心传输数据。为了保证数据的稳定传输，该系统使用4G/5G网络和LoRa这样一种低功耗广域网技术。

2.4 数据存储与管理模块

数据存储与管理模块作为系统中的关键数据节点，负责存储和管理传送到中央系统的各类数据。通过数据库及云存储技术实现冷链监控系统大范围历史数据存储，并为后续分析及异常追溯提供支撑。

2.5 预警与监控模块

预警与监控模块在冷链物流监控系统中处于核心地位，承担着实时数据分析及异常预警等功能。

3. 监控与预警系统的理论基础

3.1 温湿度监控理论

温湿度监控理论指出：环境温度波动对食品保质期有直接影响。通过对温度、湿度等数据进行实时采集与存储，冷链物流系统可以准确地对环境参数进行控制，保证食品在合适的环境中进行运输与贮存，提高食品货架期。

3.2 风险评估与预测模型

基于温湿度等环境因素的历史数据，通过机器学习模型（如LSTM或RNN）对温湿度变化趋势进行建模，系统能够提前预测未来的温湿度状态。

3.3 异常检测与预警算法

常见的异常检测技术主要有两种：一种是基于统计学的方法，另一种是依赖于机器学习的方法。该系统采用基于LSTM深度学习算法进行建模，可以通过对温度和湿度历史变化趋势的学习来准确地识别出异常情况，及时进行报警，从而提高冷链运输中食品的安全性。

4. 模拟仿真实验设计

4.1 实验目的与设计思路

为验证基于物联网冷链物流监控及预警系统在实践中有效性及稳定性，实验设计目的是模拟冷链运输中温度及湿度变化，对该系统预警精度，响应速度和数据传输性能进行了评价。通过设定不同温湿度环境条件对系统进行环境异常监控能力实验分析，利用仿真实验数据对温湿度预测模型进行进一步优化与标定，以增强系统预测精度与响应效率。

4.2 实验环境与参数设置

实验是在可控制冷链模拟环境下进行的，布置了若干个带有温湿度监控及数据传输功能的传感器以模拟真实冷链运输数据获取过程。我们的实验环境被划分为三个不同的温湿度级别：标准环境（3℃至5℃）、临界环境（5℃至8℃）以及异常环境（>8℃）。记录各场景下不同温度和湿度水平食品质量变化数据用于评价系统预警准确率。本实验以4G网络为数据传输媒介来模拟真实物流中数据传输，保证了传感器数据实时传输及准确性。

4.3 实验流程与数据采集频率

实验时，各传感器每十分钟对温湿度数据进行一次自动采集和上传，模拟出冷链物流运输过程实时监测。所收集的数据被实时地传送到中央数据库中以便进行后续分析和处理。为了促使数据采集更加稳定连续，在实验中监控了数据传输成功率，记录了数据丢失率，分析了数据丢失率对预警系统产生的影响。

4.4 温湿度预测模型的选择

在本实验中，温湿度的预测模型采用长短期记忆网络算法，以准确捕捉冷链运输过程中温湿度的变化趋势。LSTM是一种循环神经网络，能够有效处理时间序列数据中的长时依赖问题。设 $T(t)$ 为时间 t 时刻的温度值，预测模型的基本公式为：

$$T(t+1) = f(T(t), T(t-1), \dots, T(t-n))$$

其中， f 为通过LSTM模型训练得到的函数，用于预测下一个时刻的温度值。温湿度预测的优化目标为：

$$\min_{\theta} \sum_{t=1}^T (T(t+1) - \hat{T}(t+1|t))^2$$

其中， θ 为模型参数， $\hat{T}(t+1|t)$ 为基于已有观测值预测的温度值。通过优化该目标函数，可以最小化预测值与实际值之间的误差，从而提高温湿度预测的准确性。

在预警算法中，采用了异常检测机制，将预测温度值 $\hat{T}(t+1)$ 与设定的温度阈值进行比较。当预测值超出阈值时，系统触发预警信号：

$$\text{Alert}(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{T}(t+1) > T_{th} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

该公式用于实时判断温度预测值是否超出安全范围，从而保证冷链环境的安全性。通过多次仿真实验，结合不同温湿度情境的数据，模型进一步校准异常阈值和预警参数，

以提高系统的异常检测能力和响应速度。

5. 实验结果与数据分析

5.1 实验结果指标与定义

为了对冷链物流监控及预警系统性能进行系统性评价,研究选择如下4个核心指标,分别是准确率,响应时间,数据传输成功率以及能耗。准确率度量了系统对于温度和湿度异常检测的准确性;响应时间是指该系统在发现异常至发出警告之间的持续时间;数据传输成功率体现的是传感器传输数据时的完整性;并利用能耗对系统运行时能源消耗进行评价。

实验结果指标定义如下:

准确率: 定义为系统正确识别出异常的次数与总异常次数的比值,以百分比表示,公式为:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{正确识别的异常次数}}{\text{总异常次数}} \times 100\%$$

响应时间: 定义为系统检测到温湿度异常到发出预警的平均时间,用分钟表示,计算公式为:

$$\text{Latency} = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{预警时间} - \text{异常检测时间})}{N}$$

其中 N 为实验中检测到的异常总数。

数据传输成功率: 表示在实验中成功传输的数据量与总数据量的比率,公式如下:

$$\text{Data Transmission Success Rate} = \frac{\text{成功传输的数据量}}{\text{总数据量}} \times 100\%$$

能耗: 系统在监控过程中的总能耗,以毫瓦时 (mWh) 为单位。

5.2 系统准确率与响应时间分析

实验结果显示,系统在检测温湿度异常时的准确率达到 98.5%,响应时间则平均控制在 10 分钟以内。以下是实验数据汇总表:

实验次数	总异常次数	正确识别异常次数	准确率 (%)	响应时间 (分钟)
1	40	39	97.5	12
2	45	44	97.8	11
3	42	42	100	9
4	43	42	97.7	10
5	44	43	97.7	8

从数据中可以看出,系统在多次实验中均保持较高的异常检测准确率,且响应时间平均控制在 10 分钟以内,证明系统具备较强的实时性和精确性。

5.3 数据传输成功率分析

在冷链物流过程中,数据传输的可靠性是确保系统稳定运行的关键。通过记录每次传感器数据的传输情况,实验中计算出数据传输成功率平均达到 98.9%。以下是部分实验数据:

实验次数	总数据量 (条)	成功传输数据量 (条)	传输成功率 (%)
1	1000	990	99
2	950	940	98.9
3	1100	1088	98.9
4	1050	1042	99.2
5	980	968	98.8

数据表明系统在不同实验条件下的传输成功率稳定在 98.8% 以上,保证了冷链数据的实时性与完整性,从而提升了监控预警的可靠性。

5.4 能耗分析

能耗是系统运行成本的重要评估指标。本实验通过记录系统运行过程中的电力消耗,得出平均每次实验的总能耗为 16.8 mWh。以下是实验能耗情况汇总:

实验次数	采集数据频率 (分钟)	实验时长 (小时)	总能耗 (mWh)
1	10	24	17.5
2	10	24	16.3
3	10	24	16
4	10	24	17
5	10	24	17.1

分析可见,系统在 10 分钟采集频率下的能耗较低,约为 16.8 mWh。能耗的合理控制不仅降低了运行成本,同时为实际部署提供了节能参考,使得该系统适用于长时间、大规模的冷链监控。

综合以上实验结果,本文提出的冷链物流监控与预警系统在准确率、响应时间、数据传输成功率和能耗四个核心指标上均表现出色,具备实际应用的可行性。

6. 结论与讨论

6.1 准确率

经过实验验证,该系统在异常检测方面的准确性稳定在 97.5% 或更高,某些实验的准确率甚至超过了 100%,这证明了该系统在识别温度和湿度超标风险方面具有极高的准确率。该成果充分验证了物联网监控及预警系统对于冷链运输中温湿度异常的辨识可靠性,满足食品冷链物流对于数据准确性更高的要求。这种高准确率的原因是该系统采用了高级 LSTM 预测模型对温湿度时间序列变化趋势进行有效捕

获，降低了短期波动造成的误报、漏报现象。

6.2 延迟时间

从响应时间的角度看，系统的平均响应时间被限制在10分钟之内，而最短的响应时间可以达到8分钟。该性能表现表明系统识别异常后具有快速响应能力，能在异常环境条件对食品质量可能产生影响前及时报警，符合冷链物流实时性要求。尽管响应时间已经达到较优水平，但仍存在一定的改进空间，未来可以通过优化数据传输路径和预警算法以进一步减少延迟时间，从而提高预警的时效性和精度。

6.3 数据传输成功率

在实验过程中，该系统的的天数据传输成功率稳定维持在98.8%或更高，其中最高可以达到99.2%。该结果表明该系统能实现实际应用时稳定可靠地数据传输，保证中央数据库对冷链运输时监控数据的实时接收，并避免数据丢失造成监控盲点。这一高数据传输成功率归因于系统使用了多种网络传输技术（如4G/5G和LoRa），适应了冷链物流中复杂的传输环境，提升了数据的传输可靠性。在今后应用时，由于5G网络覆盖面越来越大，预计数据传输稳定性将得到进一步提升。

6.4 能耗

能耗分析结果表明：在十分钟数据采集频率范围内，

该系统平均能耗达到16.8 mWh，满足节能需求。这种低能耗表现，使系统长期处于冷链监控状态，具有良好可持续性。实验数据显示，该系统全天候工作时能耗一直很低，验证了所用低功耗传感器及优化电力管理设计的正确性。鉴于物联网设备工作环境大多为流动或者偏僻冷链运输环境下，节约能源这一特点进一步提高了该系统实用性。

参考文献：

- [1] 党耀东,蔡晋辉,柯海森,等.一种冷链温湿度监测系统的设计与实现[J].电子器件,2024,47(2):570-576.
- [2] 邵海龙,陈丽萍,董毓淇.基于微信小程序的冷链物流监控管理系统设计[J].物流技术,2023,42(9):106-109.
- [3] 李愈娜.基于物联网技术的食品冷链闭环监控系统研究[J].中国储运,2024(3):133-134.
- [4] 雷梦婷,薛亮.基于物联网的冷链运输管理信息系统设计[J].软件工程,2022,25(1):4.
- [5] 易金平,吕鹏辉.基于区块链的冷链物流金融业务模式分析[J].中国物流与采购,2023(8):78-79.

作者简介：

杨璐佳(1988.08-),男,汉族,北京人,本科,现就职于北京云食季餐饮管理有限公司,研究方向:食品冷链物流技术创新应用。