

面向农产品冷链物流监测的无线气体传感器在线校准方法

张永军^{1,2} 张小栓^{3,4} 张长峰² 李道亮¹ 傅泽田^{3,4}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 山东商业职业技术学院, 济南 250103;
3. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083; 4. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 鲜活农产品冷链保鲜、保活运输过程中需要精确监测和控制运输微环境气体浓度, 因此实时精准地监测运输环境中各类气体成分浓度尤为重要。在长期气体浓度监测中, 传感器会发生漂移并呈现弱稳定性现象, 从而造成监测精准度降低, 导致保鲜、保活控制低效。针对该问题, 设计基于无线传感器网络的气体传感器在线校准方法, 利用融合技术对运输环境中分布式部署的无线气体传感器进行周期性选举, 筛选测量准确、稳定的领袖传感器节点组作为参考, 动态计算终端传感器漂移特征参数变化, 并使用无线通讯技术完成各类气体感知节点输出-浓度映射函数参数的修正调节, 以重新计算输出信号与气体浓度的动态映射关系。该方法可非更换地实现在线气体传感器动态校准, 从整体上修正了运输微环境中气体传感器输出-浓度映射参数以提高数据获取精度。以鲟鱼低温无水休眠保活运输为试验流程, 对重要环境气体 CO₂、O₂、NH₃ 等浓度信息进行了监测与校准试验。利用高精度、已校准的气体浓度记录仪作为运输微环境气体浓度测量标准, 进行校准试验评估。试验表明传感输出信号为 TTL 电平的 CO₂ 传感器可提高测量精度 3.28%, 其精度提高程度低于线性或非线性函数输出的气体传感器; 对于输出-浓度映射为非线性信号的 NH₃ 气体监测精度可提高 4.14%; 针对传感输出为线性函数关系的 O₂ 传感器校准效果最优, 其监测精度可提高 4.71%。综合对比运输气体变化监测数据, 验证了在不更换传感器进行离线气调校准的情况下, 所提方法可较显著地提高气体浓度监测精度, 为有效精准调节冷链运输微环境气体浓度提供了调控依据。

关键词: 农产品; 冷链物流; 监测; 气体传感器; 无线传感器网络; 在线校准

中图分类号: TP212; TS972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0309-09

Wireless Gas Sensor On-line Calibration Method for Cold Chain Logistics Monitoring of Agricultural Products

Zhang Yongjun^{1,2} Zhang Xiaoshuan^{3,4} Zhang Changfeng² Li Daoliang¹ Fu Zetian^{3,4}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, China

3. Beijing Food Quality and Safety Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fresh agricultural products and keeping live transportation in the process of cold chain requires accurate monitoring and controlling of transport micro-environmental gas concentration, thus real-time accurate monitoring and controlling all kinds of micro-environmental gas concentration is particularly important. In the long-term monitoring of gas concentration, the sensor will drift and show the phenomenon of weak stability, resulting in reduction of monitoring accuracy and low efficiency of controlling for preservation. Aiming at this problem, the design was based on wireless sensor network gas sensor for on-line calibration method, fusion techniques were used to do periodic election of logistics monitoring with distributed deployment of wireless gas sensor, measurement accuracy and stability of the

收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-04-21

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J15LN52)和农业部公益行业科研专项(201203017)

作者简介: 张永军(1977—),男,博士生,山东商业职业技术学院讲师,主要从事农业电气化研究,E-mail: Yongjunzhang@cau.edu.cn

通信作者: 李道亮(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农业先进传感与智能信息处理研究,E-mail: dliangl@cau.edu.cn

leader of sensor node group were selected as a reference, dynamically calculated the change of terminal sensor drift characteristic parameters, and wireless communication technology was used to complete correction of various types of gas sensing output mapping parameters in order to calculate dynamic mapping between output signal and gas concentration. The method can realize dynamic calibration of on-line gas concentration sensing without replacing gas sensor, and output of gas sensor in the transportation was optimized as a whole to improve the accuracy of acquisition. The method was verified by low-temperature sturgeon water-free dormant keep-live transportation tests, monitoring and calibration of concentration information for the important environmental gas CO_2 , O_2 , NH_3 and so on. The evaluation test was carried out by using high precision and calibrated gas concentration data recorder as standard for measurement of gas concentration for the micro environment of transportation. Experiments show that the sensor output signal for TTL level of CO_2 sensor can improve the measurement accuracy by 3.28%. The precision was inferior to linear or nonlinear output functions of gas sensor; for concentration output mapping of nonlinear signal, the NH_3 gas monitoring accuracy can be improved by 4.14%. The calibration method for sensor output concentration mapping for linear function of oxygen gas sensors' calibration was the best and the monitoring precision can be improved by 4.71%. Comprehensively comparing the monitoring data of gas concentration change, this method can significantly improve the accuracy of gas monitoring, which provided basis for precise monitoring and controlling of cold chain transportation micro environment gas concentration.

Key words: agricultural products; cold chain logistics; monitoring; gas sensor; wireless sensor network; on-line calibration

引言

生鲜农产品的鲜活程度是农产品冷链物流监控与追溯的主要目标,而运输微环境保鲜气体调控对保障生鲜农产品的品质发挥着重要作用。由于气敏传感器自身的原因,其输出信号由于环境因素、自身老化等原因都会发生漂移现象^[1-3]。根本解决漂移问题在于提高气敏传感器的可靠性和稳定性,但这需要在物理、化学、材料及制造工艺等多方面进行突破,成本较高;因此使用信号处理方法对传感器漂移影响进行修正是一种低成本的选择。在农产品冷链物流实际监控过程中,传感器在其有效期内长期处于工作状态中,因此不便更换校准维护。使用在线漂移分析能够利用当前时刻之前的信息进行校准模型的建立与调整处理^[4-8],然后完成对后续时刻漂移影响的预判处理与校准调整。近年来,随着鲜活农产品冷链物流的高速发展,部署在冷藏车内大量的气体传感器需要校准和更换维护以保证有效的气调监控。进行在线补偿或校准需要的先验知识有限性与漂移无规律性是在线漂移抑制中一对主要矛盾^[9-12]。设计基于无线传感器网络的在线近似校准管理方法,建立在线维护系统是解决冷链精准高效监控的有效手段^[13-14]。为有效改善气体传感器长期漂移所带来的监测不精确、不稳定性以及在无法替换现有传感器进行离线气调校准的情况下,有

效地提高气体监测的精度、提升微环境控制效率,本文设计一种易于嵌入式片上系统实现的无线气体传感器网络,以分布式融合数据为气体浓度标准,周期性地在线进行气体传感器校准维护处理,以期改善鲜活农产品冷链配送品质提供低成本技术保障。

1 气体传感器获取预处理与参考点选取

1.1 气体传感器采集模型

设有 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 是 n 个相同输出特征的气体传感器集合^[15-16],且某传感节点在 t 时刻监测获取的气体浓度数据可表示为

$$P_i(t) = X(t) + \varepsilon \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 $X(t)$ —— t 时刻环境气体真实浓度

ε ——传感器测量噪声或测量误差

1.2 运输微环境气体感知数据预处理

对于气体传感器获取的浓度数据,在进行融合处理之前应该先对数据进行清洗,消除粗大误差和异常数据^[17-18],以防止这些异常数据对数据融合的影响。常用消除误差或异常点的技术有:基于距离的方法(Cook 距离、WK 距离、平均拟合度量)和基于假设检验的方法(t 准则、莱茵达准则、格拉布斯(Grubbs)准则、狄克逊(Dixon)准则、肖维乐准则)。在实际运用中要合理使用上述方法对获取的传感数据进行粗大误差剔除,而由传感器失效或其他外部环境因素引起偏差也会对获取的数据精度产生较大

的影响。因此,需对传感器观测数据的有效性进行预先甄别,以提高后续数据融合的精准度。为获得较好的融合效果,本文采用 t 准则进行数据预处理。

1.3 领袖气体节点组的选取原则

为了实现在线非更换校准操作,校准系统使用微环境无线气体传感器监测的融合数据作为校准的标准数据,对运输环境气体浓度进行周期性的感知采样与校准。在消除粗大误差后,计算在 t 时刻 P_i 节点采样 $P_i(t)$ 与其他气体传感节点监测数据的平均距离为

$$\overline{D}(t) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n D_{ij}(t) \right) \quad (2)$$

其中 $D_{ij}(t) = |P_i(t) - P_j(t)|$

式中 $D_{ij}(t)$ ——气体感知节点 $P_i(t)$ 和 $P_j(t)$ 的绝对距离

将所有气体感知测量出现在气体浓度真值 X 邻域、且满足 $\sum_{j=1}^n D_{ij}(t) < \overline{D}(t)$ 的节点集合 P 保留。假设有 m 个节点,相对稳定、健壮的传感器融合度矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & P_{12}(t) & \cdots & P_{1m}(t) \\ P_{21}(t) & 1 & \cdots & P_{2m}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1}(t) & P_{m2}(t) & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

上式融合度越高,且融合度分布越均衡,则其观测值在融合过程中所占权重应越大。因此考虑以传感器的一致融合度^[15-16]与分布均衡度之积作为传感器的权重系数, t 时刻传感器 P_i 的权重系数为

$$W_i^{(t)} = \frac{\theta_i^{(t)}}{\sum_{i=1}^m \theta_i^{(t)}} = \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}(t)}{m \sum_{j=1}^m \left(\frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}(t)}{m} - F_{ij}(t) \right)^2} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}(t)}{m} - F_{ij}(t) \right)^2$$

其中 $F_{ij}(t) = \exp \left(-\frac{1}{2} |P_i(t) - P_j(t)| \right)$

式中 $W_i^{(t)}$ ——信任度权重, $0 \leq W_i^{(t)} \leq 1$

$F_{ij}(t)$ ——融合度函数, $0 \leq F_{ij}(t) \leq 1$

在无线自组网络气体浓度感知监测数据采集模

式下,计算每个气体传感节点的一致性与稳定性综合的信任度权重 $W_i^{(t)}$,并排序。选取信任度权重较大的多个节点集合 $\rho^* \subset \rho, \rho = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_m(t)\}$ 作为领袖气体节点组,对其感知数据进行均值处理,用以作为在线校准其他节点的标准气体浓度。即在某段时间段内计算微环境融合的气体浓度作为该段时间内校准参考标准浓度。

2 无线气体传感器在线校准方法

2.1 气体传感器输出信号-浓度函数关系

在保鲜、保活运输环境监测中,气敏传感器输出信号是电压、电流或 TTL 数字信号。统计记录并建立气体浓度变化与这些信号的对应关系将其归结为环境气体浓度与输出信号的线性关系或非线性关系。实际冷链运输监测时,引起环境气体浓度 C 与输出信号 P 对应关系变化的因素较多,如传感器气敏材料、传感器老化和振动程度、温湿度等。统计这些变化规律建立一元线性或非线性回归模型进行相关性分析重新建立漂移后的函数关系,是动态非更换校准的基本思路。常用的线性或非线性回归函数如表 1 所示。

表 1 常用线性或非线性回归函数

Tab.1 Common linear and non-linear regression functions

类型	函数说明	名称
线性 $f_L(P)$	$C = \beta_0 + \beta_1 P$	一元线性
非线性 $f_{NL}(P)$	$C = \left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{P} \right)^{-1}$	双曲线
	$C = \beta_0 P^{\beta_1}$	幂函数曲线
	$C = \beta_0 e^{\beta_1 P}$	指数曲线
	$C = \beta_0 e^{\frac{\beta_1}{P}}$	倒指数曲线
	$C = (\beta_0 + \beta_1 e^{-P})^{-1}$	S 型曲线
	$C = \beta_0 + \beta_1 \ln P$	对数曲线
	$C = \beta_0 + \beta_1 P + \dots + \beta_k P^k \quad (k=1,2,3)$	多项式曲线

表 1 中的函数参数 $\beta_0 \sim \beta_k$ 为回归系数, P 为传感器输出电压或电流, C 为某气体浓度。在确定回归系数时,在实际使用时可根据传感器的输入与输出响应曲线,绘制散点图确定几种相关性较好的回归函数,按各类回归方法进行参数估计和显著性检验,选择最优的回归函数作为基准参照函数对其他传感器进行校准。因为在实际物流过程中传感器特性和类型已确定,因而最优相关拟合函数类型是已知的,但其函数最优参数随时间漂移缓慢变化,需要周期性的动态测定。

2.1.1 气体传感器线性信号输出回归参数求解

当传感器输出-浓度映射函数是一元线性函数输出的电压或电流型信号时,气体浓度监测传感器

在线校准系统通过不同时刻的局部气体监测浓度与融合标准气体浓度相差最小的原则来求解变化的线性输出函数 $f_L(P_i)$ 的回归参数, 回归参数^[2-3]满足

$$\phi_L = \arg \min_{\beta_0, \beta_1} \sum_{t=1}^N [f_L(P(t)) - \bar{C}_t]^2 \quad (4)$$

式中 $f_L(P(t))$ ——线性函数信号

\bar{C}_t ——领袖气体节点组在时刻 t 的融合浓度

ϕ_L ——线性函数信号目标函数

由 $\frac{\partial \phi_L}{\partial \beta_0} = 0, \frac{\partial \phi_L}{\partial \beta_1} = 0$ 求解得待定线性回归参数

$\beta_0, \beta_1, \sum_{i=1}^N$ 是多个气体传感器获取气体浓度与标准参考浓度差之和。

2.1.2 气体传感器非线性输出回归参数求解

当传感器输出-浓度映射函数是一元非线性输出, 即电压或电流信号与气体浓度映射关系为表1中非线性函数 $f_{NL}(P)$ 情形。根据实际传感器的特性分析发现传感器输出-浓度映射函数多为幂函数、指数或多项式曲线的映射关系。气体传感器校准系统通过与线性映射相同的原理来计算的回归参数满足

$$\phi_{NL} = \arg \min_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} \sum_{t=1}^N [f_{NL}(P(t)) - \bar{C}_t]^2 \quad (5)$$

式中 $f_{NL}(P(t))$ ——非线性函数信号

ϕ_{NL} ——非线性函数信号目标函数

对已知特征非线性信号输出的信号, 由如表2所示的非线性输出最小目标函数计算。

表2 非线性输出最小目标函数

Tab.2 Objective function of non-linear output

非线性信号	目标函数
幂函数 $\phi_{PowerNL}$	$\arg \min_{\beta_0, \beta_1} \left(\sum_{i=1}^N (\ln \beta_0 + \beta_1 \ln P_i - \ln \bar{C}_i)^2 \right)$
指数函数 ϕ_{ExpNL}	$\arg \min_{\beta_0, \beta_1} \left(\sum_{i=1}^N (\ln \beta_0 + \beta_1 P_i - \ln \bar{C}_i)^2 \right)$
多项式 ϕ_{PolyNL}	$\arg \min_{\beta_1, \dots, \beta_k} \left(\sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^k (\beta_j P(t))^j - \bar{C}_i \right]^2 \right)$

通过计算 $\frac{\partial \phi_{NL}}{\partial \beta_i} = 0$, 求得 $\beta_0 \sim \beta_k$ 等待定的非线性函数回归参数。

2.1.3 气体传感器 TTL 信号输出调整参数求解

对于出厂已集成封装完好的调理电路气体传感器, 其输出信号为 TTL 浓度数字指示数值。对该类型输出应计算获取不同时刻传感节点感知浓度与融合标准浓度的样本方差以便调节修正减小因漂移等因素引起的测量误差。传感器的校准, 即将 C 校准为 $C \pm \Delta C$, 即

$$C = C \pm \Delta C \quad (6)$$

式中 ΔC ——调整参数, 其调整值为不同时刻节点输出

气体浓度数据的样本标准差为

$$\sqrt{(n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (\bar{C}_i - C_i)^2}。当 \sum_{i=1}^n (\bar{C}_i - C_i) > 0,$$

则式(6)为 $C = C - \Delta C$; 当 $\sum_{i=1}^n (\bar{C}_i - C_i) < 0$, 则

式(6)为 $C = C + \Delta C$; 当 $\sum_{i=1}^n (\bar{C}_i - C_i) = 0, C = C$ 。

2.2 气体传感器在线校准方法

为了准确、动态、在线非更换地校准运输微环境内所有气体感知节点, 首先使用 t 准则检验方法获取并消除气体浓度信号粗大误差, 同时对分布式收集的气体数据进行智能融合处理。对获取后的气体数据在网关节点进行领袖气体节点组的选择并融合计算当前微环境气体浓度标准; 此后在网关使用领袖气体节点组对不同时刻的感知数据进行函数拟合, 计算回归参数。最后, 按融合处理的参考标准对分布式部署的气体感知节点进行校准操作, 修正终端气体传感器节点输出-浓度映射函数参数, 使用无线通讯方式将修正的参数记录在气体传感器片上系统闪存中, 修正因传感漂移等因素引起的测量误差, 提高气体浓度测量精度。无线气体传感器网络环境下在线校准过程如下:

(1) 协调器同步无线网络环境下各节点, 进行气体数据采集, 运用 t 检验准则消除粗大误差, 根据传感器的输出特征选定回归参数待定的节点输出-浓度函数 $f(P)$ 。

(2) 气体浓度监测数据在网关节点根据分组数据, 构建融合度矩阵 M , 使用融合技术进行领袖气体节点组的选择, 将融合值作为校准标准浓度 \bar{C}_t 去拟合计算 $f(P)$ 的回归参数。

(3) 网关节点根据气体传感器输出-浓度映射函数类别进行在线的、分不同时段记录融合标准浓度 \bar{C}_t , 选取执行拟合效果最优方法使得目标函数

$\arg \min_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} \sum_{t=1}^N [f(P(t)) - \bar{C}_t]^2$ 达到最小, 计算最优回归参数 $\beta_0 \sim \beta_k$ 或调整参数 ΔC 。

(4) 将网关计算的回归参数 $\beta_0 \sim \beta_k$ 或调节参数 ΔC , 通过协调器广播至每个分布式部署的气体感知节点进行校准参数修改。

(5) 气体感知节点收到校准参数将参数写入到无线气体传感器片上系统的非易失闪存中, 完成感知节点输出-浓度映射参数调整, 结束一次在线校准修正处理。

鲜活农产品冷链保鲜物流过程中, 微环境感知

传感器实时监测运输微环境气体浓度等信息并利用协调器发送至移动车载网关进行动态监控与校准操作。无线网关实时传输微环境气体浓度数据至后台数据中心以便进行远程监控与决策。无线移动车载网关自动执行气体信号采集和校准计算处理,最终求解得到校准系数或调整参数反馈至终端气体传感节点进行参数修正。在线校准系统周期性地校准以修正气体传感器的各类漂移带来的测量不准确问题。动态在线校准过程如图 1 所示。

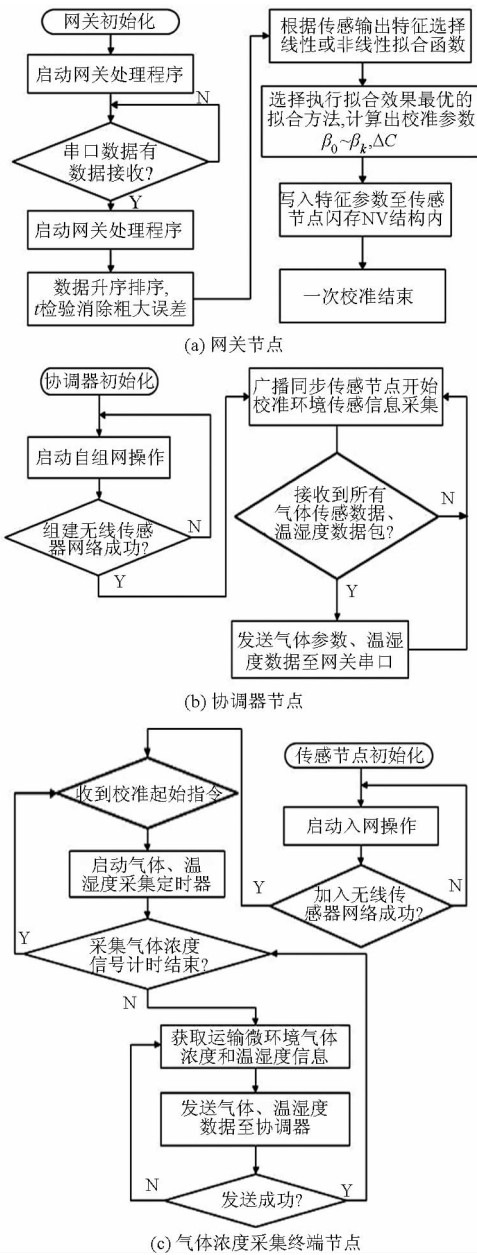


图 1 冷链物流中无线气体传感器动态在线校准示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of dynamic online calibration of wireless gas sensor in cold chain logistics

3 无线气体传感器在线校准系统

3.1 无线气体传感器校准系统硬件描述

基于无线传感器网络的在线非更换动态校准系

统硬件模块分为 3 部分:冷藏运输车内微环境气体浓度感知节点、无线收集分布式微环境感知信息的协调器节点和无线移动数据处理的车载网关,如图 2、3 所示。

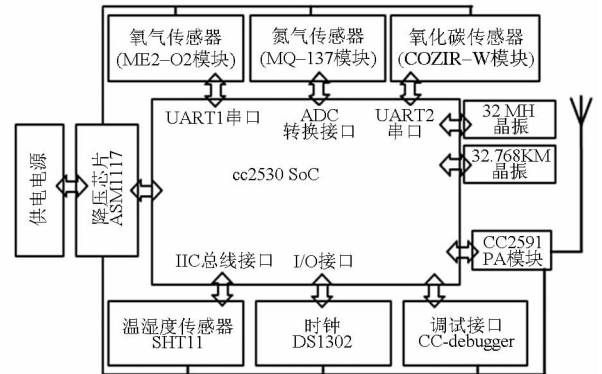


图 2 冷藏运输车内微环境感知节点结构图

Fig. 2 Structure of micro environment sensing node in

chill car

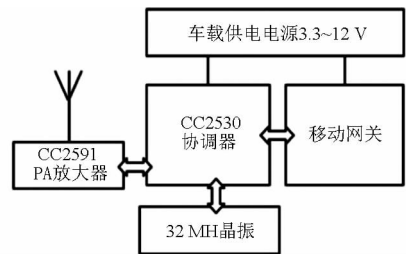


图 3 微环境数据收集协调器与移动车载网关

Fig. 3 Micro environment data collection coordinator and mobile data processing vehicle gateway

3.2 校准系统软件模块分类与实现

为了更好实现气体传感器的在线校准,在线校准代码被下载到 3 类位置。第 1 类位置是部署在终端气体传感器节点上进行自动间歇气体浓度数据采集、执行校准回归参数写终端节点片上系统闪存的操作。该部分软模块是基于 TI 公司的 CC2530 协议栈实现的,以完成气体信号采集转换与无线数据收发。第 2 类嵌入式代码是基于 CC2530 协议栈的 C 语言实现并部署在协调器上,使用 CC Debugger 仿真调试器下载至协调器模块,用来实现气体传感器网络的组建,实现校准同步、数据汇集分组与无线转发任务。第 3 类软件模块部署在无线车载网关节点上,实现数据融合校准与数据上传任务。该部分功能是 JAVA 语言开发,部署运行在基于 Android 4.2 系统上,其架构设计采用多线程实现同步协同处理任务,在无任务时可休眠,实现了低功耗数据处理。

4 在线气体传感器校准试验

为验证不同输出-浓度映射函数关系的气体传感器校准效果,采用了多种输出类型的气体传感器

集合进行试验。按相应的输出-浓度映射函数分为线性输出的氧气传感器、非线性输出的 NH_3 传感器以及 TTL 电平输出的 CO_2 传感器。对气体传感器的内置回归参数进行在线校准效果的试验。

试验设计所需的气体传感器设备规格如下： O_2 传感器采用炜盛公司的 ME2- O_2 ，其量程 0~30%，工作环境温度为 -20~55℃，湿度小于 95%；水产品氨气代谢监测采用 MQ-137 型半导体气体传感器，其监测量程为 0~300 mg/L，工作环境温度 -20~50℃，湿度小于 95%；监测水产品呼吸排放的二氧化碳传感器采用英国 GSS 公司宽量程 COZIR-W 型探头，其气体浓度监测量程为 0~20%，工作环境温度 -25~55℃，湿度小于 95%；温湿度传感器使用瑞士 SENSIRION 公司的 SHT-11 型传感器。为了精确对比较准效果，试验部署在冷藏运输车内一组精度、稳定性较高的高端传感器组作为校准优劣参考标准。其设备选取如下：氧气浓度标准数据由 DT200- O_2 型氧气监测记录仪获取，其线性误差小于 1%，零点漂移小于 1%；二氧化碳气体浓度，采用 LS500LW 型二氧化碳气体浓度记录仪作为二氧化碳浓度标准数据采集设备，其测量误差小于 3%，零点漂移小于 2%； $7\text{NE}/\text{NH}_3-500\text{p}$ 型氨气传感器作为运输中氨气参考标准，测量误差小于 1%，零点漂移小于 2%。集成气体传感器实现的无线气体监测传感器网络芯片采用 TI 公司具有自组网特点的 CC2530 模块。

4.1 冷链物流气体传感器校准试验

真实冷链物流气体传感器校准试验以北京北水食品有限公司的鲟鱼无水保活运输作为试验流程。对低温休眠鲟鱼进行运输微环境气体浓度监测与校准试验。首先，鲟鱼经过 48 h 暂养后，经冷水梯度降温休眠后安全捞出，并在鱼尾打二维码尾签用以追溯标示；然后，鲟鱼被安全平铺在带有凹槽的透气运输托盘上，每个托盘布置 6~8 尾鱼，托盘可分层堆放，每条鲟鱼质量约 3~4 kg，本次运输共运输 100 尾鲟鱼。分层之间留有较大的间隙以保证氧气供给和氨气、二氧化碳气体的扩散。试验运输路线为北京北水食品厂运送至中国农业大学烟台研究院，运输时间为 10 h 左右。冷链运输车内微环境条件为：运输温度波动范围控制在 1~4℃ 和湿度 35%~65%。在保鲜冷藏车内部署氧气、二氧化碳、氨气浓度监测的 3 类无线气体传感器模块（每类 5 个相同类型的气体传感器）和一个数据汇集协调器无线模块。在驾驶室内部署移动网关设备，其内嵌入 Android 4.2 系统和校准控制系统程序进行高复杂度的气体传感器在线校准控制处理。智能移动网关

和协调器设备使用车载供电方式供电，终端气体浓度传感器节点使用电池供电。终端节点均匀布置在冷藏车内部以便较好融合获取冷藏车内微环境气体浓度。校准试验的气体传感器被安装在带孔的防水、减振盒内，利用吸盘均匀固定在冷藏车的车壁水平中线上。进行校准试验的 3 类高精度气体传感器被放置在车内中部靠近车壁处空置的托盘上，并利用防水、减振盒包装，包装盒侧面带孔以保证透气性。该传感器组使用锂电池组供电，带有时间的气体浓度数据记录在 SD 卡中，可精确记录微环境气体浓度。进行试验的气体传感器其固定方式都有减振作用，以消除振动对数据采集精度的额外影响。经试验记录得到整个校准时间为 10~15 min，每间隔 5 s 完成一次采样，其数据获取频率高于平时监测的例行气体浓度采集任务。为了能有效验证方法的效率，监测校准气体传感器均为使用半年以上的使用中气体传感器。使用本方法针对产生漂移问题的气体传感器进行在线校准，用精度、稳定性较高的高端传感器对校准效果进行评估。

4.2 分布式数据获取与融合数据拟合分析

在监测鲟鱼保活运输环境气体浓度变化过程中，使用多种拟合方法对采集后预处理数据与融合标准数据进行拟合计算，以完成一次运输过程中气体传感器校准试验。选取合适的拟合计算方法的目标是为了减少在线校准计算时间的同时又能低误差求解气体传感器输出-浓度映射回归参数以提高校准精度。在线拟合方法^[14,19]选用有代表性的最小二乘法(LS)、径向基神经网络(RBP)、最小二乘支持向量机法(LS-SVM)^[20-22]、B 样条函数^[23]、分段线性函数^[24]进行在线拟合求解回归参数。

使用本文校准方法进行拟合处理，根据各类方法的误差分析选取性能和效率较优的拟合方法。经试验计算分析输出-浓度映射函数为非线性关系的拟合方法中最小二乘支持向量机法效率最优，其拟合的相关系数为 0.932，执行的拟合计算时间 0.928 s，均方根误差为 0.163；而输出-浓度关系呈线性函数的拟合计算中，分段线性拟合法和向量机法都体现出较优的效率和较少的执行代价。分段线性拟合均方根误差为 6.05×10^{-3} ，执行的拟合计算时间为 0.479 s，相关系数为 0.984。分析比较得出分段线性拟合效果更为优化，其拟合速度快，相关性高，误差较小。因此在试验实施中选用最小二乘支持向量机法实现非线性函数的拟合计算，使用分段线性拟合方法进行线性函数拟合计算，在线地校准求解回归参数。在实际应用中需要根据气体传感器输出-浓度映

射函数关系选取拟合效果好,执行速度快,方便在移终端上部署与运行的方法。实施试验的整个校准过程中,车载移动网关分别执行多种不同的拟合求解方法进行校准操作,并记录校准计算时间,以便选取高效可行的处理方法。线性和非线性函数输出信号回归参数求解方法对比见图 4 和图 5。

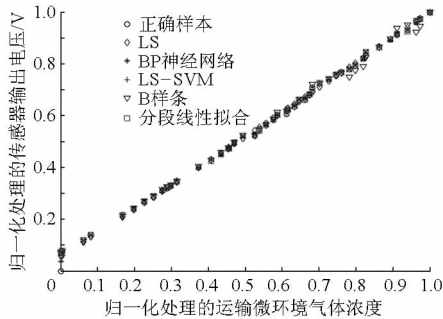


图 4 线性回归参数拟合计算对比

Fig. 4 Comparison of linear fitting calculation for regression parameters

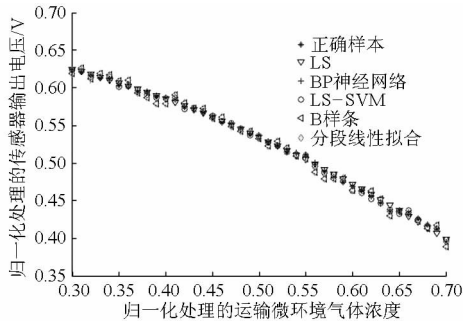


图 5 非线性回归参数拟合计算对比

Fig. 5 Comparison of nonlinear fitting calculation for regression parameters

4.3 在线校准系统性能分析

为了能清晰地对比校准前与校准后气体数据采集精度,使用归一化的平均绝对误差、平均相对误差来度量校准调整的效果。在鲟鱼无水保活运输试验中进行在线校准处理后,在终端气体传感器的闪存上记录校准前后输出-浓度映射回归参数,按照 10 s 一次的频率获取气体浓度数据,采集 100 min 内多个间歇时间点气体浓度数据进行试验对比分析。

通过对比分析发现在线校准对 TTL 数字输出的校准精度提高程度低于线性与非线性函数映射信号输出的校准操作,其校准效果平均提高了 3.28%;气体传感器输出-浓度线性函数映射的校准效果最好,其精度比未校准时测量效果平均提高了 4.71%,非线性函数映射输出的校准调整略差一些,其测量精度提高了 4.14%。通过对比分析得出,虽然气体浓度 TTL 数字信号输出型传感器使用简单,可直接获取环境气体浓度数据,但可校准优化的程度较低。而线性与非线性传感输出是以电压或电流

为自变量形式的气体浓度映射函数关系,所以选取并优化拟合函数形式并进行回归参数计算,可较大地提高其测量精度。综上所述,在冷链物流微环境中,气体浓度测量以电压或电流信号输出形式居多,因此采用本文校准方法则更为有效。在线校准性能分析中,采用误差分析处理进行数据分析以方便度量校准效果。平均绝对误差是计算测量值与真实值之间的平均绝对值。其中,真实值由高精度气体传感器读数近似代替。归一化平均绝对误差按
$$\frac{V_{MAE} - (\{e_i\})_{Min}}{(\{e_i\})_{Max} - (\{e_i\})_{Min}}$$
 计算,其中 $(\{e_i\})_{Max}$ 表示多次测量绝对误差的最大值, $(\{e_i\})_{Min}$ 表示多次测量绝对误差的最小值, $\{e_i\}$ 表示多次测量绝对误差的集合, V_{MAE} 表示平均绝对误差。

为了准确描述在线校准效果,本文还利用平均相对误差来反映测量的可信程度。平均相对误差由先计算标准偏差值,然后除以真实标准值再乘以 100% 计算得出。

在线气体传感器校准提高效果如图 6、7 所示。

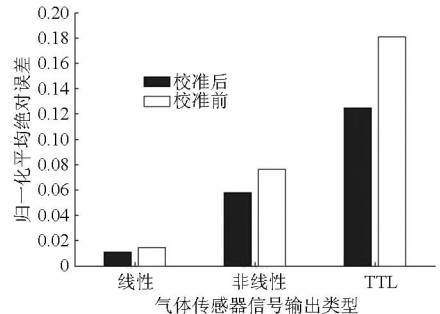


图 6 气体传感器校准前后的归一化平均绝对误差

Fig. 6 Normalized mean absolute error of gas sensor before and after calibration

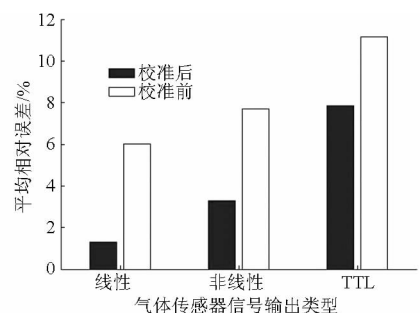


图 7 气体传感器校准前后的平均相对误差

Fig. 7 Average relative error of gas sensor before and after calibration

5 结束语

在鲜活农产品冷链保鲜、保活运输过程中,针对气体传感器实施在线不更换的校准方法可缓解传感器长期漂移引起的气体浓度监测的不稳定性和不准确性。本文采用基于无线传感器网络的气体传感

器,分布式部署并运用在鲜活农产品冷链物流微环境气体浓度监测过程中,以实现传感器的动态校准任务。在线校准方法采用数据预处理和在线融合,拟合校准技术处理因漂移等问题带来的不准确、不稳定性监测问题,解决了气体传感器在监测中非离线校准测量领域的应用难题。验证试验结果表明该校准方法可以在不更换传感器的前提下获得较高精

度的气体浓度感知信息。因此,面向农产品冷链物流监测的无线气体传感器在线校准方法既是一种数据校准处理方法,也是一种传感器维护管理的方法,在不需要增加更多额外的硬件设施情况下,可实现运输微环境气体浓度变化的高精度测量,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- ALEXANDER V, SHANKAR V, AYHAN T, et al. Chemical gas sensor drift compensation using classifier ensembles [J]. *Sensors and Actuators B*, 2012, 20(5):320-329.
- SANTIAGO Medina-Rodríguez, ÁNGEL de la Torre-Vega, CARLOS Medina-Rodríguez, et al. On the calibration of chemical sensors based on photoluminescence: selecting the appropriate optimization criterion [J]. *Sensors and Actuators B*, 2015, 212: 278-286.
- GENG Zongyu, YANG Feng, CHEN Xi, et al. Gaussian process based modeling and experimental design for sensor calibration in drifting environments [J]. *Sensors and Actuators B*, 2015, 216:321-331.
- 傅中君,周根元. 金属氧化物气体传感器的非线性处理方法[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(9):1188-1192.
FU Zhongjun, ZHOU Genyuan. A nonlinear processing method of metal oxide gas sensors [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(9):1188-1192. (in Chinese)
- 崔远慧,唐祯安,余隽. 气体传感器的动态高精度测试系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(10):2180-2185.
CUI Yuanhui, TANG Zhen'an, YU Jun, et al. Design of a dynamic high-precision characterizing system for gas sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10):2180-2185. (in Chinese)
- 刘涛,黄智勇. 气敏传感器漂移补偿的数据选择方法[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(4):75-79.
LIU Tao, HUANG Zhiyong. A data selection method applied to on-line drift compensation for gas sensors [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(4):75-79. (in Chinese)
- 张敏,田逢春. 气体传感器阵列温度漂移抑制的研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(6):1237-1239.
ZHANG Min, TIAN Fengchun. Research on the temperature drift suppressing of gas sensor array [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(6):1237-1239. (in Chinese)
- 丁晖,刘君华. 气体传感器特性漂移抑制的研究[J]. *计量学报*, 2002, 23(1):69-73.
DING Hui, LIU Junhua. Study on the drift rejection for gas sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(1):69-73. (in Chinese)
- 谭秋林,裴向东,熊继军,等. 光学气体检测中的插值-数据查表浓度计算与补偿方法[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(11):1484-1487.
TAN Qiulin, PEI Xiangdong, XIONG Jijun, et al. The interpolation-data look-up table method for concentration calculation and compensation in optical gas measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(11):1484-1487. (in Chinese)
- 武晓利,张广军. 红外二氧化碳传感器动态特性校准与改进研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(1):59-62.
WU Xiaoli, ZHANG Guangjun. Dynamic characteristics calibration and dynamic performance improvement of infrared carbon dioxide sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(1):59-62. (in Chinese)
- 张学典,王业生,伍雷. 基于非色散红外 CO₂ 浓度测量的温度补偿研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(4):412-414.
ZHANG Xuedian, WANG Yesheng, WU Lei. Research on temperature compensation for CO₂ concentration measurement based on NDIR [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4):412-414. (in Chinese)
- 张朋,陈明. 声表面波 CO 气体传感器温度误差补偿方法研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(1):3-6.
ZHANG Peng, CHEN Ming. Study on temperature compensation method in SAW CO gas sensors [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(1):3-6. (in Chinese)
- 齐林,韩玉冰,张小栓,等. 基于 WSN 的水产品冷链物流实时监测系统[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(8):134-140.
QI Lin, HAN Yubing, ZHANG Xiaoshuan, et al. Real time monitoring system for aquatic cold-chain logistics based on WSN [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(8):134-140. (in Chinese)
- 王想,肖新清,朱志强,等. 鲜食葡萄冷链物流气体传感器响应特征试验研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):240-246.
WANG Xiang, XIAO Xinqing, ZHU Zhiqiang, et al. Experimental study of response characteristics of gas sensors for monitoring table grape cold-chain logistics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):240-246. (in Chinese)
- 韩峰,杨万海,袁晓光,等. 基于相关性函数和模糊贴近度的多传感器数据融合[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(4):227-229.
HAN Feng, YANG Wanhai, YUAN Xiaoguang, et al. Multi-sensor data fusion based on correlation function and fuzzy clingy degree [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(4):227-229. (in Chinese)
- 杨国宁,冯秀芳,樊刘娟. 一种基于最优融合集的多传感器数据融合算法[J]. *软件学报*, 2012, 23(1):134-140.
YANG Guoning, FENG Xiufang, FAN Liujuan. Multi-sensor data fusion algorithm based on optimal fusion set [J]. *Journal of Software*, 2012, 23(1):134-140. (in Chinese)

- 17 李登辉,李智. 基于测量信息论的小样本粗大误差处理研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(6):115-117.
LI Denghui, LI Zhi. Processing of gross error in small samples based on measurement information theory [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(6):115-117. (in Chinese)
- 18 刘振宇,周思杭. 基于多准则修正的产品性能多参数关联分析与预测方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15):105-114.
LIU Zhenyu, ZHOU Sihang. Multiple parameters correlation analysis and prediction method of product performance based on multi-criteria modification [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15):105-114. (in Chinese)
- 19 厉英,王正. BP神经网络漏钢预测系统优化[J]. 控制与决策, 2010, 25(3):453-456.
LI Ying, WANG Zheng. Optimization for breakout prediction system of BP neural network [J]. Control and Decision, 2010, 25(3):453-456. (in Chinese)
- 20 潘宇雄,任章,李清东. 动态贝叶斯最小二乘支持向量机[J]. 控制与决策, 2014(12):2297-2300.
PAN Yuxiong, REN Zhang, LI Qingdong. Dynamic Bayesian least squares support vector machine [J]. Control and Decision, 2014(12):2297-2300. (in Chinese)
- 21 孟银凤,梁吉业. 基于最小二乘支持向量机的函数型数据回归分析[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(12):1124-1130.
MENG Yinfeng, LIANG Jiye. Regression analysis for functional data based on least squares support vector machine [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(12):1124-1130. (in Chinese)
- 22 郭振凯,宋青召,毛剑琴. 一种改进的在线最小二乘支持向量机回归算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(1):145-148.
GUO Zhenkai, SONG Zhaoqing, MAO Jianqin. An improved online least squares support vector machines regression algorithm [J]. Control and Decision, 2009, 24(1):145-148. (in Chinese)
- 23 朱庆生,曾令秋,屈洪春,等. 基于粒子群算法的B样条曲线拟合[J]. 计算机科学, 2009, 36(10):289-291.
ZHU Qingsheng, ZENG Lingqiu, QU Hongchun, et al. Curve fitting of B-spline based on particle swarm optimization [J]. Computer Science, 2009, 36(10):289-291. (in Chinese)
- 24 闫秋艳,夏士雄. 一种无限长时间序列的分段线性拟合算法[J]. 电子学报, 2010, 38(2):443-448
YAN Qiuyan, XIA Shixiong. An piecewise linear fitting algorithm for infinite time series [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2):443-448. (in Chinese)

(上接第 257 页)

- 18 VERMEULEN A, DANG T D T, GEERAERD A H, et al. Modelling the unexpected effect of acetic and lactic acid in combination with pH and a_w on the growth/no growth interface of *Zygosaccharomyces bailii* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 124(1):79-90.
- 19 VALERO A, RODRÍGUEZ M, CARRASCO E, et al. Studying the growth boundary and subsequent time to growth of pathogenic *Escherichia coli* serotypes by turbidity measurements [J]. Food Microbiology, 2010, 27(6):819-828.
- 20 DALGAARD P, KOUTSOUMANIS K. Comparison of maximum specific growth rates and lag times estimated from absorbance and viable count data by different mathematical models [J]. Journal of Microbiological Methods, 2001, 43(3):183-196.
- 21 李柏林,郭剑飞,欧杰. 预测微生物学数学建模的方法构建[J]. 食品科学, 2004, 25(11):52-57.
LI Bolin, GUO Jianfei, OU Jie. Research approach of microbial modeling on predictive microbiology [J]. Food Science, 2004, 25(11):52-57. (in Chinese)
- 22 邓旗,孙力军,王雅玲,等. 环境条件对腐败希瓦氏菌生物被膜形成能力的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(10):43-50.
DENG Qi, SUN Lijun, WANG Yaling, et al. The effect of different environmental conditions on the ability of *Shewanella putrefaciens* biofilm formation [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(10):43-50. (in Chinese)
- 23 杨光富,魏云林. 假单胞菌研究现状及应用前景[J]. 生物技术通报, 2011(1):37-39, 49.
YANG Guangfu, WEI Yunlin. The research status and application prospect of *Pseudomonas* [J]. Biotechnology Bulletin, 2011(1):37-39, 49. (in Chinese)
- 24 章志超,桂萌,彭朝辉,等. 鲟鱼中荧光假单胞菌生长预测模型构建及货架期预测[J]. 食品科学, 2014, 35(10):278-283.
ZHANG Zhichao, GUI Meng, PENG Chaohui, et al. Predictive modeling of *Pseudomonas fluorescens* growth and shelf life prediction of sturgeon [J]. Food Science, 2014, 35(10):278-283. (in Chinese)
- 25 FU Peng, LI Pinglan, ZHOU Kang, et al. Development of models to predict the growth of *Pseudomonas* isolated from chilling pork [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):229-234.
- 26 董庆利,王忻,苏亮,等. 基于不同初始接种量的铜绿假单胞菌生长模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):246-252.
DONG Qingli, WANG Xin, SU Liang, et al. Modeling on growth of *Pseudomonas aeruginosa* with different inoculum sizes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):246-252. (in Chinese)
- 27 LEROI F, FALL P A, PILET M F, et al. Influence of temperature, pH and NaCl concentration on the maximal growth rate of *Brochothrix thermosphacta* and a bioprotective bacteria *Lactococcus piscium* CNCM I - 4031 [J]. Food Microbiology, 2012, 31(2):222-228.
- 28 KRIST K A, ROSS T, MCMEEKIN T A. Final optical density and growth rate; effects of temperature and NaCl differ from acidity [J]. International Journal of Food Microbiology, 1998, 43(3):195-203.