

奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备设计与试验

赵文文¹ 王海峰¹ 朱君¹ 王志彬¹ 郭刚² 李斌¹

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.北京首农畜牧发展有限公司,北京 100029)

摘要:发展奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测技术对于推动畜牧业减排降碳、实现持续高质量发展具有重要意义。针对我国奶牛养殖个体瘤胃碳排放检测/监测流程繁琐、效率低、适用装备缺乏等问题,设计了一种奶牛个体瘤胃碳排放在线检测装备,并提出了基于支持向量机(SVM)的奶牛个体日碳排放量预测模型。以STM32微处理器为主控制核心,集成RFID/甲烷/二氧化碳等传感器采集数据,采用LoRa/4G双模通信技术传输数据,基于Qt Creator软件/云平台分析与显示数据,实现奶牛个体碳排放数据本地/远程一体化监测、传输、分析与可视化显示。采用背景浓度扣除法与时间点对齐重构方式,构建了基于SVM的奶牛个体碳排放预测模型,实现浓度数据到奶牛个体碳排放量准确测算。在北京某牧场对25头荷斯坦奶牛进行了实地测试,与二氧化碳平衡法相比,基于SVM回归预测模型的奶牛平均日二氧化碳排放量、甲烷排放量、碳排放量MAE平均值分别为511.13、58.16、2 202.10 g/d;MRE平均值分别为3.78%、14.34%、8.55%;在牛舍打开风机情况下,SVM预测奶牛个体平均二氧化碳排放量、甲烷排放量、碳排放量波动幅度分别为10.85、8.15、255.35 g/d,均显著低于二氧化碳平衡法对应差值。研究结果能够实现奶牛个体瘤胃甲烷和二氧化碳排放量实时、快速、准确测定,可为农牧业碳排放量精准核算提供技术参考。

关键词: 奶牛个体; 瘤胃; 碳排放; 在线检测; 支持向量机; 二氧化碳平衡法

中图分类号: TP391; S82 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0386-11 OSID: 

Design and Testing of Online Monitoring Equipment for Individual Cow Rumen Carbon Emissions

ZHAO Wenwen¹ WANG Haifeng¹ ZHU Jun¹ WANG Zhibin¹ GUO Gang² LI Bin¹

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China
2. Beijing Shounong Livestock Development Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The online detection technology for rumen carbon emissions of individual dairy cows is of great significance for promoting emissions reduction and carbon mitigation in animal husbandry, and achieving sustainable high-quality development. In order to solve the problems of cumbersome, inefficient and a lack of suitable equipment for detecting individual rumen carbon emissions in China's dairy farming, an online detecting device was designed. Additionally, an SVM-based model for predicting daily methane emissions from individual cows was proposed. The equipment was mainly controlled by STM32 microprocessor, integrating RFID/methane/carbon dioxide sensors to collect data, and using LoRa/4G dual-mode communication technology to transmit data. Based on Qt Creator software/cloud platform, data was analyzed and displayed to achieve local/remote integrated monitoring, transmission, analysis and visualization of individual carbon emissions data of cows. To obtain the daily carbon emissions of individual cows, an SVM-based prediction model was constructed by using the background concentration deduction and time point alignment reconstruction methods. Field tests were conducted on 25 Holstein cows at a certain ranch in Beijing. Compared with the CO₂ balance method, the SVM regression prediction model showed MAE averages of 511.13 g/d, 58.16 g/d, and 2 202.10 g/d, and MRE averages of 3.78%, 14.34%, and 8.55% for the average cattle emissions of carbon dioxide, methane, and carbon, respectively. Moreover, when the fan was turned on, the SVM

model predicted that the average carbon dioxide emissions, methane emissions, and carbon emission fluctuations of cattle individuals were 10.85 g/d, 8.15 g/d, and 255.35 g/d, respectively. These fluctuations were significantly smaller than those derived from the carbon dioxide balance method. This study can achieve real-time, rapid, and accurate measurement of methane and carbon dioxide emissions from individual cow rumens. It can provide technical support for the precise accounting of carbon emissions in the agricultural and livestock sectors.

Key words: cow; rumen; carbon emission; online detecting; support vector machine; carbon dioxide balance method

0 引言

温室气体排放造成全球性极端气候和生态环境危机频发,给世界各国带来共同挑战^[1]。据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)报道,畜牧业产生的温室气体占全球温室气体总量 14.5%,其中,约 80% 牲畜温室气体排放和 90% 甲烷(methane,CH₄)排放来自反刍动物^[2]。奶牛作为反刍动物碳排放量较高的畜种,约 80% CH₄通过瘤胃发酵以嗝气方式排出,并与呼吸代谢产生的二氧化碳(carbon dioxide,CO₂)气体共同加剧了温室效应,每年可排放温室气体(以 CO₂当量计)约 4.675 × 10⁹ t^[3]。因此,有效检测和科学跟踪测算奶牛个体瘤胃碳排放量,对推动反刍动物养殖减排降碳具有重要战略意义。

CH₄作为农牧业活动主要的碳排放源,造成温室效应是 CO₂的 28 倍。目前,国内外学者主要围绕牛个体瘤胃 CH₄排放量检测方法进行了大量研究。检测方法主要包括传统检测法和传感器检测法,其中传统检测法包括呼吸代谢室法、SF₆示踪法、二氧化碳平衡法等;传感器检测法主要为 GreenFeed 系统、遥感检测法等^[4-5]。在呼吸代谢室法检测方面,张相伦等^[6]利用大型动物开放回流式呼吸测热装置,采用全收粪尿法进行消化代谢试验,探讨了饲料粗蛋白质含量对肉牛 CH₄产生量的影响。毛宏祥等^[7]利用呼吸代谢室法,评估了 6 个经典肉牛胃肠道 CH₄排放估算模型的预测精度并分析了相关原因。在 SF₆示踪法检测方面,文献[8-9]利用 SF₆示踪技术,通过设置不同日粮精粗比和 NDF/NFC 比例,对奶牛瘤胃 CH₄排放量进行测定,以达到 CH₄排放减少、日粮消化率提高的目的。文献[10-11]利用 SF₆示踪技术,对荷斯坦奶牛的 CH₄产量进行了研究,并结合生产性能数据估算采食量。在二氧化碳平衡法检测方面,文献[12-13]利用二氧化碳平衡法,在牛舍自然通风的情况下分别监测牛舍 CH₄、NH₃、CO₂、H₂S 排放量。美国 C-Lock 公司研发的 GreenFeed 系统可实现反刍动物代谢气体的精

准检测,是当前行业内较为认可的一款用于反刍动物碳气体排放的精准检测装备。文献[14-15]利用 GreenFeed 系统、呼吸室法和 SF₆检测技术测量牛只肠道 CH₄排放量,并进行对比分析,验证 GreenFeed 的可靠性。文献[16-18]利用 GreenFeed 系统研究奶牛 CH₄排放特征,并提出了减排调控方法。在遥感检测法方面,李弘振等^[19]利用无人机遥感技术设计开发了一套 CH₄遥感检测系统用于奶牛养殖场 CH₄监测。传统方法具有检测数据可靠性高的优点,但存在测量指标单一、检测流程繁琐、人工投入多等问题,不适合大批量牛只个体排放水平快速检测;GreenFeed 系统存在采购成本高、无法获取原始数据等问题;遥感检测可实现奶牛养殖场 CH₄分布的快速检测,但无法具体到牛只个体。此外,上述研究多集中在反刍日粮营养结构、优化改良动物品种、使用添加剂降低温室气体排放等方面,关于牛只个体碳排放量自动检测装置研发方面鲜有涉及。

针对上述问题,本文设计一种奶牛个体瘤胃碳排放在线检测装备,并提出一种基于支持向量机(Support vector machine,SVM)的奶牛个体日碳排放预测模型,在线检测奶牛瘤胃 CH₄、CO₂排放量,并利用 IPCC 系数法及 2019 年温室气体国际标准(ISO 14064-1)计算奶牛个体碳排放量,以期实现数据本地化记录与分析、日碳排放量的精准预测,为规模化养殖牧场快速、检测/监测奶牛瘤胃碳排放量提供新方法 with 装备。

1 奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备设计

1.1 检测装备总体设计

奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测系统由下位机、执行单元、上位机组成。检测系统如图 1 所示,下位机以 STM32 微控制器为核心,基于 FreeRTOS 系统实现多线程任务分配,主要包括身份识别单元、头部距离检测单元、气体检测单元等,并通过 RS485 通信方式实现 STM32 微控制器与各传感单元之间的数据采集,设定采样频率为 1 Hz。执行单元主要由下料电机、直流风机及抽气气泵等执行单元组成,

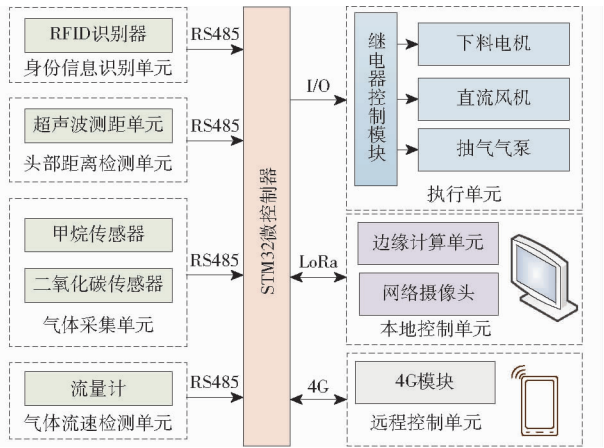


图1 检测装备总体设计

Fig.1 Design of detection equipment

利用 GPIO 引脚及结合阈值判断机制,通过控制器 I/O 实现对执行单元的控制。其中,下料电机执行单元主要执行下料指令,将诱食颗粒输送至食槽内;直流风机执行单元,利用管道系统内形成压力差,将过滤后的奶牛瘤胃排放气体输送到外部;抽气气泵执行单元,对即将输送至外部的 气体进行抽样处理,并输送至气体采集单元。上位机分别以 Qt Creator、有人云平台为载体,采用 LoRa、4G 双模通信技术,实现检测信息的显示、记录、分析及系统作业参数设置等。

系统工作时,若 RFID 识别器检测到奶牛到访,则通过储料箱、下料管道将饵料投放至食槽中,诱导奶牛在进气孔附近长时间连续进食,利用直流风机形成的负压环境,在主通路管道中将奶牛呼出的气体依次通过一级过滤装置、流量计、气体抽样管道后排入空气中,气体抽样管道将获取的抽样气体依次经过抽样气泵、二级过滤装置,进入气体采集单元,在线获取抽样气体中奶牛呼出的 CH₄ 和 CO₂ 含量,并将数据上传本地和远程控制单元记录和分析。

1.2 检测装备硬件设计

奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备,如图 2 所示,主要由食槽、直流风机、网络摄像头、超声波测距传感器、RFID 识别器、储料箱、抽样管道、一级过滤装置等组成。装备采用优质碳钢材料,整体尺寸为 1 200 mm × 800 mm × 2 100 mm,气体采集单元尺寸为 220 mm × 170 mm × 110 mm,内置 2 种气体传感器,采用泵吸方式,检测奶牛呼出气体成分。CO₂ 浓度检测采用基于非分散红 外线性技术 (Nondispersive infrared spectroscopy, NDIR) 的红外传感器,型号为 JX - CO₂ - 103 - 5W,品牌为精讯畅通,测量范围 0 ~ 50 000 × 10⁻⁶,分辨率 1 × 10⁻⁶,测量精度满量程的 ± 5%。CH₄ 使用电化学式传感器

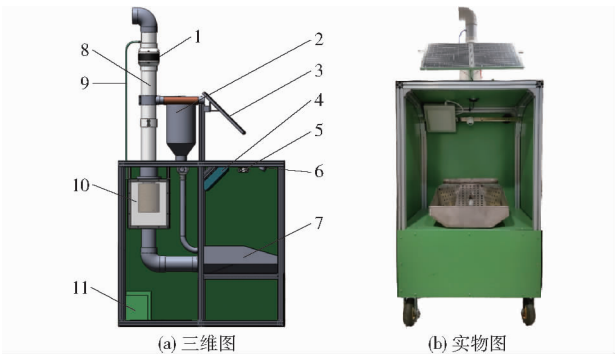


图2 奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备

Fig.2 Online detecting equipment for rumen carbon emissions of individual dairy cows

1. 直流风机 2. 储料箱 3. 太阳能板 4. RFID 识别器 5. 超声波测距传感器 6. 网络摄像头 7. 食槽 8. 气体管道 9. 抽样管道 10. 一级过滤装置 11. 气体采集单元

进行检测,传感器品牌为岐洛物联,测量范围 0 ~ 10 000 × 10⁻⁶,分辨率 1 × 10⁻⁶,测量精度满量程的 ± 5%。抽样气泵采用直流无刷真空正压泵,流量不小于 1.8 L/min。

1.3 检测装备软件设计

系统以 Keil μVSION5 为开发环境,采用 C 语言对下位机各单元进行程序设计,下位机数据检测与传输流程如图 3 所示。本地控制单元以 Windows 10 为开发平台,依托 Qt Creator 集成开发环境,利用 C++ 语言、MySQL 数据库、OpenCV 库进行界面设计,包括串口设置模块、数据显示模块、数据记录模块、参数设置模块等,实现检测信息的显示、存储、查询、分析等,如图 4 所示;同时基于有人云 4G 模块搭建微信小程序监测助手,实现本地和远程一体化监测。此外,系统中各传感器、串口通信均统一配置为波特率 9 600 bps、数据 8 位、无奇偶校

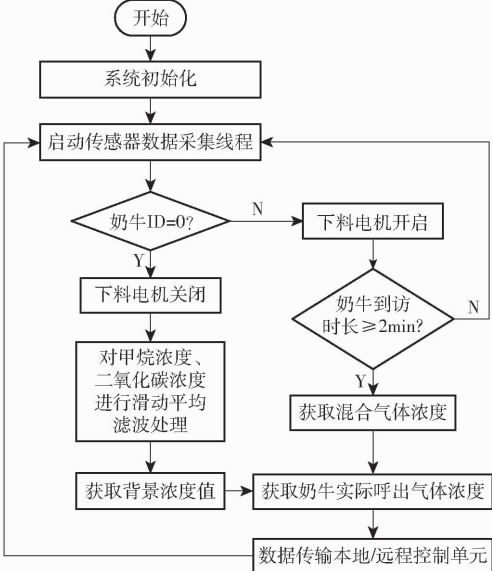


图3 检测装备软件流程图

Fig.3 Software flowchart of detection equipment

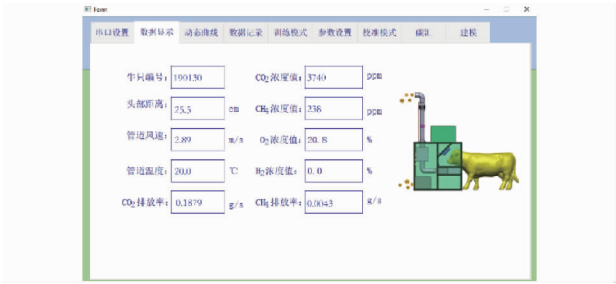


图 4 本地控制单元界面

Fig. 4 Local control unit interface

验位、停止 1 位。

2 模型构建

2.1 基于二氧化碳平衡法的奶牛碳排放量计算

为测定奶牛个体碳排放量,利用环境监测节点获取数据,采用二氧化碳平衡法计算牛舍通风量;再计算牛舍 CH₄、CO₂排放通量^[20-21],最后测算牛舍内奶牛个体平均 CH₄排放量、CO₂排放量以及碳排放量。

CH₄排放通量指单位时间内单个动物 CH₄排放速率,CH₄排放通量计算式为

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{V(C_{\text{e,CH}_4} - C_{\text{l,CH}_4})}{N} \quad (1)$$

式中 Q_{CH_4} ——单位时间内每头奶牛 CH₄排放通量,mg/(h·头)

V ——牛舍通风量,m³/h

N ——牛舍内奶牛数量,头

$C_{\text{e,CH}_4}$ ——牛舍进气口 CH₄浓度,mg/m³

$C_{\text{l,CH}_4}$ ——牛舍出气口 CH₄浓度,mg/m³

牛舍通风量则根据二氧化碳平衡法进行计算,计算式为

$$V = \frac{V_{\text{CO}_2} \times 10^6}{C_{\text{e,CO}_2} - C_{\text{l,CO}_2}} \rho_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

其中

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{0.0036f_cTHP \times N \times 273}{\left(\frac{16.18}{R_q} + 5.02\right)(T_i + 273)} K_{\text{m,CO}_2} \quad (3)$$

式中 V_{CO_2} ——单位时间内牛舍内 CO₂产生量,m³/h

ρ_{CO_2} ——CO₂密度,kg/m³

$C_{\text{e,CO}_2}$ ——牛舍进气口 CO₂浓度,mg/m³

$C_{\text{l,CO}_2}$ ——牛舍出气口 CO₂浓度,mg/m³

THP ——单位时间内奶牛代谢产生热量,W/头

f_c ——奶牛活动时产生的热量变化系数

R_q ——奶牛呼吸熵,取 1.0

T_i ——环境温度,℃

$K_{\text{m,CO}_2}$ ——CO₂修正系数,取 1.0

采用国际农业与生物系统工程协会 (International Commission of Agricultural and Biosystems

Engineering,CIGR) 推荐的奶牛代谢产热量 THP 和奶牛活动时产生的热量变化系数 f_c 计算式分别为

$$THP = 5.6W^{0.75} + 22Y_1 + 1.6 \times 10^{-5}P^3 \quad (4)$$

$$f_c = 1 - 0.23 \sin\left(\left(2\pi/24\right)(h + 6 - h_{\min})\right) \quad (5)$$

式中 W ——奶牛平均体质量,kg

Y_1 ——平均产奶量,kg/d

P ——奶牛平均受孕天数,d

$h_{\min}$ ——一天中活动最少的时间,取中午夜后

2.2 h

h ——0~24 h 中某时刻,取 09:00

在获取 CO₂ 和 CH₄ 排放量的基础上,利用 IPCC 系数法计算奶牛个体平均碳排放量,依据 2019 年温室气体国际标准 (ISO 14064-1) CO₂ 的 GWP 为 1、CH₄ 的 GWP 为 30,则奶牛个体平均碳排放量 = CO₂ 排放量 × 1 + CH₄ 排放量 × 30。

2.2 基于 SVM 的奶牛个体碳排放量预测模型构建

为准确预测奶牛个体瘤胃日碳排放量,构建基于 SVM 的奶牛个体碳排放量预测模型,首先对数据预处理将无效数据剔除,获取奶牛实际呼出气体浓度 C_e ;再剔除毛刺值,获取群体日数据集 D_c 及筛选奶牛个体日数据集 B_k ,构建 SVM 预测模型及奶牛个体排放规律;最后计算奶牛个体日碳排放量。

2.2.1 数据预处理

为保证采集数据的有效性与分析结果的可靠性,若识别奶牛 ID 连续时长小于 2 min,即表示此时间段的数据为无效数据,进行剔除。基于背景扣除法获取奶牛实际呼出气体浓度分为 2 种情况,未识别牛只 ID 时,气体采集单元所检测的气体浓度为牛舍背景气体浓度 C_b ,为抑制瞬时波动,采用滑动平均滤波算法对背景气体浓度进行处理,计算算术平均值作为当前时刻有效背景浓度 C_b ;识别奶牛 ID 时,气体采集单元检测的气体浓度为奶牛呼出气体与牛舍背景气体的混合气体浓度 C_m ,则此刻奶牛实际呼出气体浓度 C_e 为混合气体浓度 C_m 减去牛舍有效背景浓度 C_b 。

在获取奶牛实际呼出气体浓度的基础上,将 25 头奶牛 21 d 的检测数据按照每日时间点对齐重构方式获取群体日数据集 D_c ,对同一时刻存在多条记录的时间点,计算该时刻数据的算术平均值;对无重复时刻的唯一数据点,保留原始值,数据集 D_c 计算式为

$$D_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} x_i(t) & (N_t \geq 2) \\ x_i(t) & (N_t = 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_t —— t 时刻的有效数据次数

$x_i(t)$ —— t 时刻原始值

同时,以奶牛 ID 为标签,对 21 d 同一奶牛的数据进行筛选,按照数据集 D_c 获取 25 组奶牛个体日数据集 B_k , 计算式为

$$B_k(t)=\begin{cases}\frac{1}{\mu_t^k}\sum_{d=1}^{21}x_k^d(t)&(\mu_t^k\geqslant 2)\\x_k^d(t)&(\mu_t^k=1)\end{cases}\quad (7)$$

式中 μ_t^k ——第 k 头牛 21 d 数据中,在 t 时刻有效数据次数

$x_k^d(t)$ ——第 k 头牛第 d 天时刻原始值

2.2.2 SVM 预测模型构建

试验期间奶牛自由访问检测设备,存在部分时段采食空缺导致数据缺乏的问题,针对奶牛日数据集 B_k 中缺失的时间段,利用 SVM 进行回归预测,获取奶牛个体排放规律。

设定样本训练集 $\varphi=\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)\}$, $x_i\in R^m,y_i\in R,i=1,2,\cdots,n$ 。其中 x_i 为输入因子, y_i 为期望值, n 为训练样本总数量,则在 m 维输入空间中,构造超平面模型为

$$f(x)=w^Tx+b\quad (8)$$

式中 w —— m 维空间的法向量

x ——超平面内的点

b ——位移项

SVM 进行回归处理时需引入不敏感系数 ε 控制拟合精度,借助松弛变量 ξ_i 与 ξ_i^* 容纳拟合误差,约束条件为

$$\begin{cases}y_i-w^Tx_i-b\leqslant\varepsilon+\xi_i\\w^Tx_i+b-y_i\leqslant\varepsilon+\xi_i^*\\\xi_i,\xi_i^*\geqslant 0\end{cases}\quad (i=1,2,\cdots,n)\quad (9)$$

式中 ξ_i,ξ_i^* ——拟合误差上限和下限

并依据结构风险最小化原则确定回归函数,最小化目标 J 为

$$J=\min\frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^n(\xi_i+\xi_i^*)\quad (10)$$

式中 C ——正则化常数

引入高斯核函数(Radial basis function, RBF), 计算式为

$$\beta(x_i,x_j)=\exp\left(-\frac{\|x_i-x_j\|^2}{2\sigma^2}\right)\quad (11)$$

式中 σ ——高斯核带宽

β ——高斯核函数

通过拉格朗日对偶变换后,最小化问题转换为

$$J=\min\left[\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^n(a_i-a_i^*)(a_j-a_j^*)\beta(x_i,x_j)+\sum_{i=1}^n(a_i-a_i^*)y_i-\sum_{i=1}^n(a_i+a_i^*)\varepsilon\right]\quad (12)$$

$$\text{其中}\quad \sum_{i=1}^n(a_i-a_i^*)=0\quad (i=1,2,\cdots,n)\quad (13)$$

式中 a_i,a_i^* ——拉格朗日乘子, $0\leqslant a_i\leqslant C,0\leqslant a_i^*\leqslant C$

基于高斯核函数的 SVM 预测回归方程为

$$f(x)=\sum_{i=1}^n(a_i-a_i^*)\beta(x_i,x_j)+b\quad (14)$$

利用奶牛个体排放规律,对单日相同奶牛个体检测数据补充,获取奶牛个体单日排放数据集,其过程如图 5 所示。

2.3 评价指标

采用平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)、平均相对误差(Mean relative error, MRE) 评估奶牛瘤胃碳排放在线检测装备的准确度。

3 试验与结果分析

3.1 试验设置

2025 年 3 月 25 日—4 月 16 日,在北京某牧场选择具有智能挤奶机器人、自动称重装置、刮粪板等人为干扰因素较低的养殖舍,对奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备进行长期测试,测试对象为成年荷斯坦奶牛。其中 2025 年 4 月 11—12 日受极端天气影响,未进行测试;2025 年 3 月 25 日—4 月 6 日、4 月 9 日牛舍自然通风,2025 年 4 月 7—8 日、10—11 日,以及 14—16 日于每天 13:00—19:00 牛舍采用风机通风。

牛舍整体尺寸为 9 300 cm × 2 800 cm,东西向,分为南北两栏,南北两侧采用可调节卷帘通风。撒料时间为 06:00、14:00、17:00,饲喂混合青贮饲料,奶牛自由饮食、饮水,其中南北两栏牛只情况如表 1 所示。

在试验过程,将环境监测节点分别放置在南侧栏中间和东南角位置、自研的奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备放置在采食通道处,如图 6 所示。

3.2 数据采集

奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备测试时间为每天 08:00—20:00,数据采集频率为 1 Hz;环境监测节点全天候监测牛舍内外 CO₂ 浓度和 CH₄ 浓度,数据采集频率为 10 Hz。测试期间第 1~2 天,将奶牛固定在牛颈夹处,人为训练奶牛使其适应装备,第 3 天起奶牛自由前往装备进行测试。测试期间共采集到 42 头奶牛相关数据,到访设备次数共 573 次,到访时长共 3 859 min。其中,25 头奶牛到访时间涵盖 08:00—12:00、12:00—16:00、16:00—20:00 3 个时间段,数据完整度高,如图 7 所示。本文基于 25 头奶牛到访数据构建基于 SVM 的奶牛个体日碳

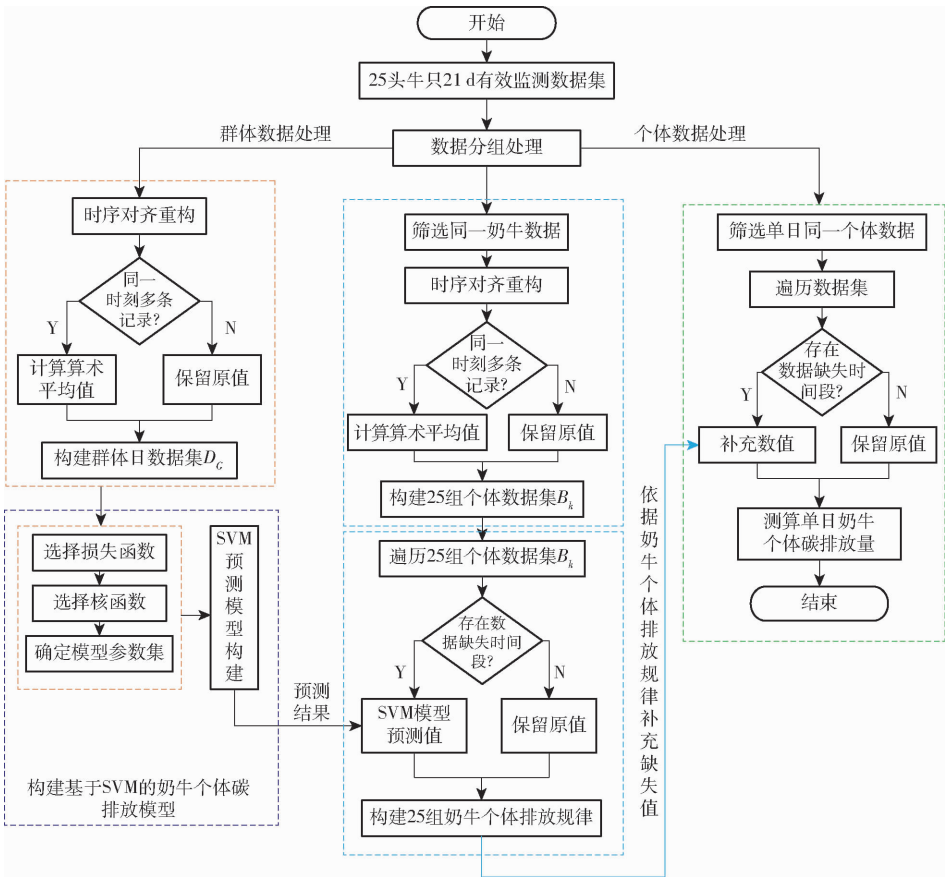


图 5 奶牛个体碳排放量预测模型构建流程

Fig. 5 Construction process of individual cow carbon emission prediction model

表 1 牛舍基本情况

Tab. 1 Basic information of cattle shed

栏位	平均头数/头	平均产奶量/ (kg·d ⁻¹)	平均体质量/kg	平均日龄/d	平均受孕天数/d
南侧栏	80	40.6	795.0	1 758	60
北侧栏	80	40.8	775.2	1 530	44

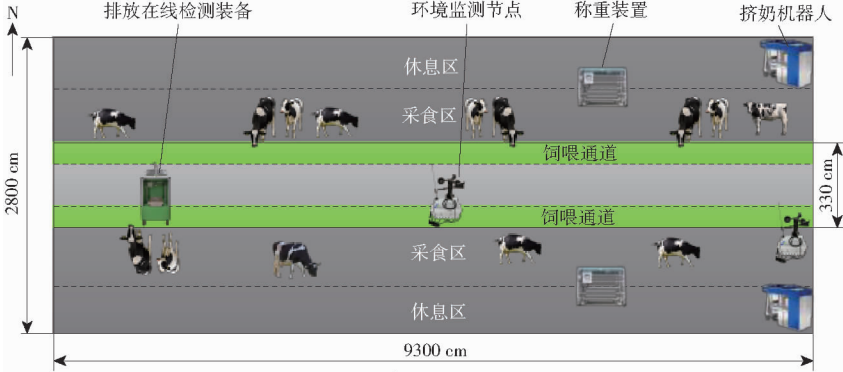
排放量预测模型。

3.3 结果与分析

3.3.1 基于二氧化碳平衡法的奶牛碳排放量结果与分析

试验期间,通过环境监测节点日均采集数据为

奶牛个体瘤胃碳
排放在线检测装备



(a) 装备放置示意图



(b) 装备现场测试

图 6 装备放置情况

Fig. 6 Equipment placement situation

8 640 条,在完成异常值剔除的基础上,分别计算舍内外 CO₂浓度和 CH₄浓度平均值,并获取两者之间浓度差值如图 8 所示,牛舍牛只基本情况如表 2 所示。

基于表 2 数据,利用式(1)~(5)进行奶牛个体平均 CO₂排放量和 CH₄排放量计算,并利用 IPCC 系数法计算奶牛个体平均碳排放量,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,奶牛个体日平均 CO₂排放量、CH₄排放量和碳排放量变化趋势一致,符合反刍动物瘤胃气体排放规律变化情况^[22-24]。在打开风机情况

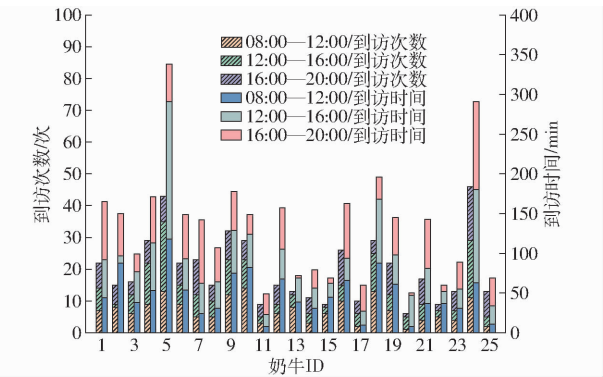


图7 25头奶牛到访情况

Fig.7 25 cows visited

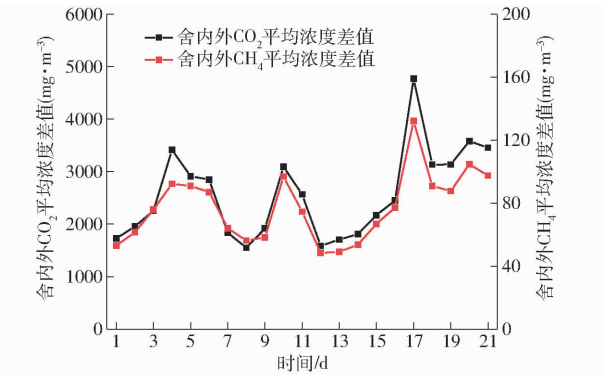


图8 舍内外CO₂、CH₄平均浓度差值曲线

Fig.8 Curves of average concentration difference of carbon dioxide and methane inside and outside

表2 试验期间舍内奶牛基本情况

Tab.2 Basic information of cows in shed during testing period

日期	平均体质量/kg	平均产奶量/(kg·d ⁻¹)	平均怀孕天数/d	牛舍平均温度/℃
03-25	775.0	40.50	42	18
03-26	773.4	40.75	43	15
03-27	783.2	41.05	44	12
03-28	773.4	41.00	45	10
03-29	776.0	39.85	46	18
03-30	772.4	42.05	47	17
03-31	788.0	39.55	48	17
04-01	772.5	41.70	49	19
04-02	784.4	40.65	50	22
04-03	786.0	40.55	51	20
04-04	787.0	42.35	52	20
04-05	771.1	41.85	53	22
04-06	781.0	41.45	54	22
04-07	774.2	40.10	55	20
04-08	781.0	40.20	56	22
04-09	779.0	41.00	57	18
04-10	775.0	38.50	58	21
04-11	781.5	40.30	59	21
04-14	785.7	39.85	62	19
04-15	792.0	40.05	63	20
04-16	791.3	40.90	64	21

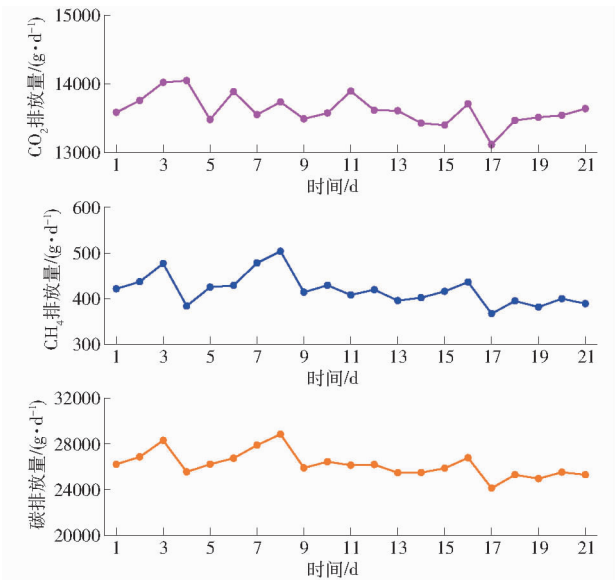


图9 奶牛个体日平均排放趋势

Fig.9 Daily average emission trend of individual cattle

下,奶牛个体平均日CO₂排放量、CH₄排放量和碳排放量分别为13 440.67、392.74、25 222.79 g/d;在关闭风机情况下,奶牛个体平均日CO₂排放量、CH₄排放量和碳排放量分别为13 709.44、432.58、26 686.89 g/d。

3.3.2 基于SVM预测模型的个体碳排放量结果与分析

为避免干扰牧场正常生产作业(推料频率90 min,推料时长15 min),在撒料和推料作业开始前,需将装备移出牛舍,在作业完成后,设备重新固定在原位置。利用式(6)获取25头奶牛21 d的群体日CO₂、CH₄排放率(数据集D_c),如图10所示。

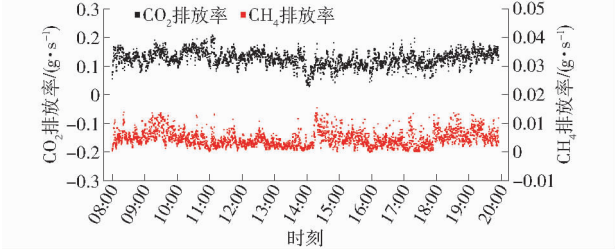


图10 群体日数据集

Fig.10 Group day dataset

为构建奶牛个体排放预测模型,训练集为群体日数据集,在完成对数据进行归一化处理的基础上,使用高斯函数作为核函数,采用网格搜索法进行参数优化,以5倍交叉验证的均方差作为SVM参数最优评估依据,其中二氧化碳排放量的最优惩罚系数C为10、高斯核参数ε为0.1,对应SVM模型交叉验证均方差最小为9.52×10⁻⁶;甲烷排放量最优惩罚系数C为1.0、高斯核参数ε为0.1,对应SVM模型交叉验证均方差最小为9.08×10⁻⁴,表明预测模型准确性和有效性。

测试集以奶牛 ID 为标签进行分类处理,将同一 ID 编号的牛只,其 21 d 观测周期内到访检测装备的有效数据进行时序整合,形成 25 组奶牛个体数据集 B_k 。按照 SVM 回归模型预测值,获取 25 组奶牛

个体排放规律模型,如图 11 所示。该融合方法确保了在保持个体行为特征的同时,有效解决了因装备覆盖不足导致数据缺失问题。

利用奶牛个体排放预测模型,完成单日时间段

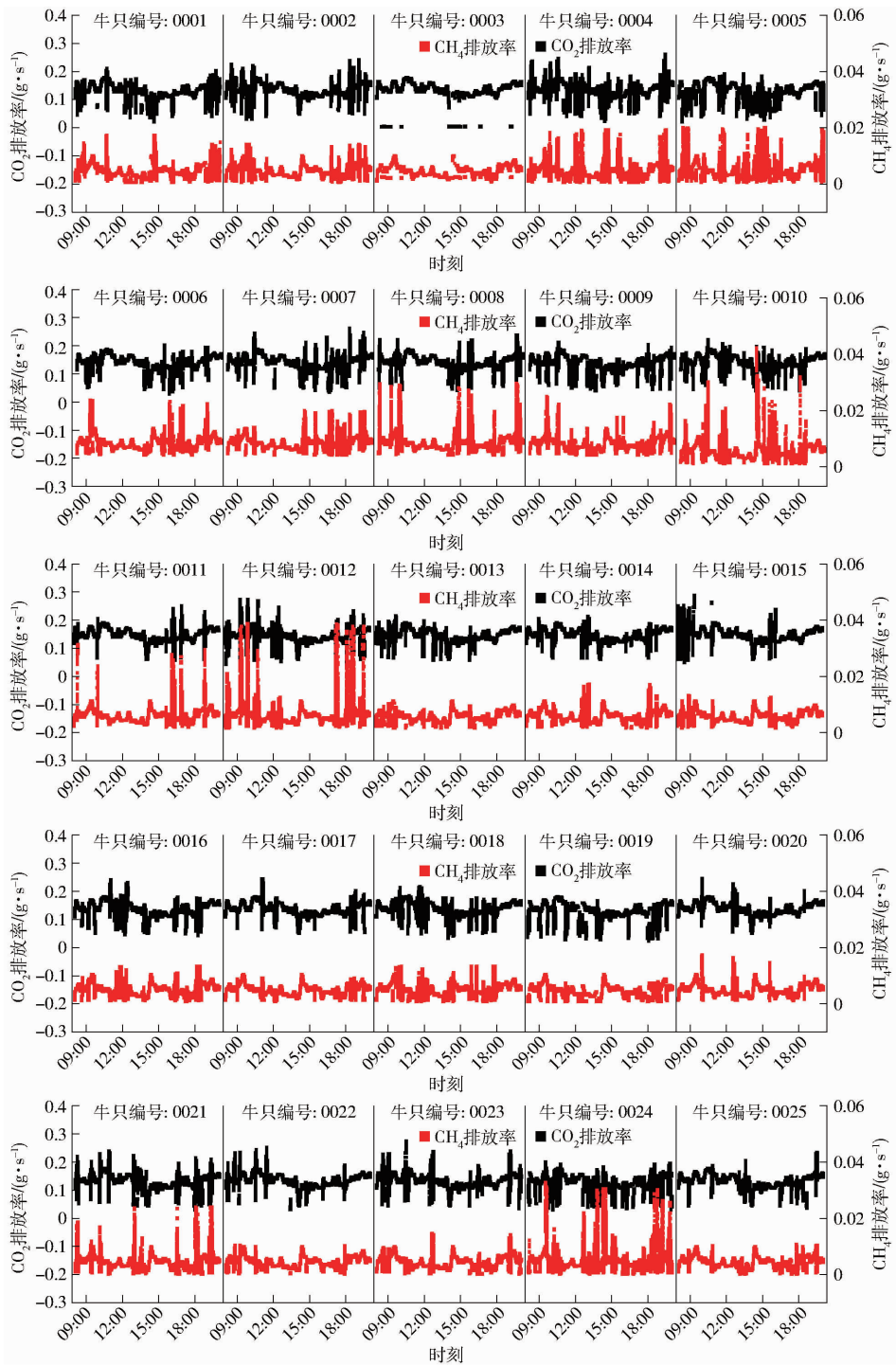


图 11 奶牛个体排放规律曲线

Fig. 11 Individual emission pattern curves of cattle

08:00—20:00 的奶牛个体碳排放量测算。为量化奶牛个体日碳排放量,基于反刍行为特征,将 24 h 划分为 3 个时段,00:00—08:00、08:00—20:00、20:00—24:00。由于奶牛反刍活动存在显著的夜间聚集性,其高峰期集中 20:00 至次日 06:00,反

当时长占全日的 60% 以上^[25-26]。加之,碳排放强度与反刍时间分布呈正相关。因此,依据比例 3:4:3,分别推算 00:00—08:00、20:00—24:00 的个体碳排放量,则奶牛个体日平均排放结果如图 12 所示。

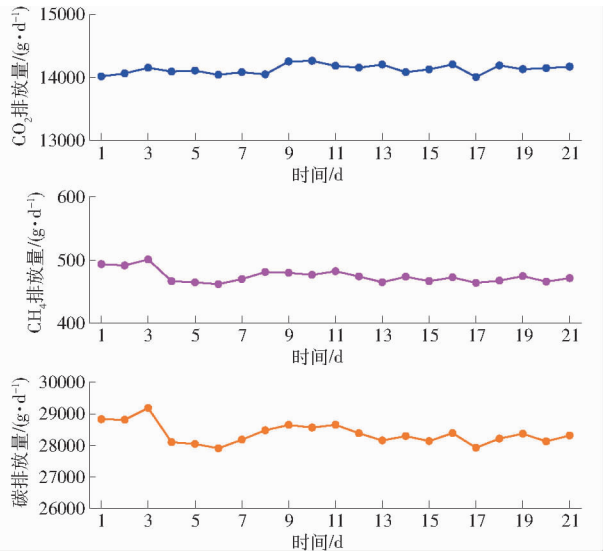


图 12 基于 SVM 的奶牛个体日平均排放趋势
Fig. 12 Daily average emission trend of individual cattle

表 3 奶牛个体日平均 CO₂排放量及误差分析

指标	日期						
	3. 25	3. 26	3. 27	3. 28	3. 29	3. 30	3. 31
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	14 017. 20	14 065. 17	14 154. 39	14 093. 67	14 108. 25	14 043. 36	14 084. 38
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	13 581. 22	13 757. 21	14 019. 15	14 046. 57	13 477. 21	13 886. 39	13 548. 66
MAE/(g·d ⁻¹)	435. 98	307. 96	135. 24	47. 10	631. 04	156. 97	535. 72
MRE/%	3. 21	2. 24	0. 96	0. 34	4. 68	1. 13	3. 95

指标	日期						
	4. 1	4. 2	4. 3	4. 4	4. 5	4. 6	4. 7
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	14 049	14 254. 91	14 263. 71	14 183. 58	14 156. 39	14 204. 39	14 085. 52
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	13 732. 88	13 487. 59	13 573. 3	13 892. 04	13 614. 19	13 608. 06	13 425. 90
MAE/(g·d ⁻¹)	316. 12	767. 32	690. 41	291. 54	542. 20	596. 33	659. 62
MRE/%	2. 30	5. 69	5. 09	2. 10	3. 98	4. 38	4. 91

指标	日期						
	4. 8	4. 9	4. 10	4. 11	4. 13	4. 14	4. 15
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	14 129. 64	14 205. 85	14 008. 02	14 190. 39	14 132. 41	14 148. 21	14 171. 99
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	13 395. 48	13 707. 63	13 112. 88	13 465. 13	13 509. 69	13 538. 95	13 636. 67
MAE/(g·d ⁻¹)	734. 16	498. 22	895. 14	725. 26	622. 72	609. 26	535. 32
MRE/%	5. 48	3. 63	6. 83	5. 39	4. 61	4. 50	3. 93

衡法波动幅度为 268. 76 g/d。结果表明,与二氧化碳平衡法相比,SVM 预测模型能够准确地反映奶牛瘤胃 CO₂排放量的真实水平,且在牛舍不同环境下,SVM 预测模型稳定性更高、波动性更小。

对 2 种方法得到的奶牛个体日平均 CH₄排放量进行统计分析,如表 4 所示。基于 SVM 模型预测值与二氧化碳平衡法测算值的 MAE 平均值为 58. 16 g/d,最大值为 97 g/d,最小值为 24. 22 g/d; MRE 平均值为 14. 34%,最大值为 26. 44%,最小值为 1. 73%。在打开风机情况下 SVM 预测模型平均值波动幅度为 8. 15 g/d,二氧化碳平衡法波动幅度为 39. 84 g/d。结果表明,与二氧化碳平衡法相比,SVM 预测模型能够准确地反映牛只瘤胃 CH₄排放

由图 12 可知,奶牛个体日平均 CO₂排放量、CH₄排放量和碳排放量变化趋势基本一致,符合反刍动物瘤胃气体排放规律变化情况^[22-24]。其中,在打开风机情况下,奶牛个体平均日 CO₂排放量、CH₄排放量、碳排放量分别为 14 123. 74、469. 06、28 195. 63 g/d;在关闭风机情况下,奶牛个体平均日 CO₂排放量、CH₄排放量和碳排放量分别为 14 134. 59、477. 21、28 450. 98 g/d。

对 2 种方法得到的奶牛个体日平均 CO₂排放量进行统计分析,如表 3 所示。基于 SVM 模型预测值与二氧化碳平衡法测算值的 MAE 平均值为 511. 13 g/d,最大值为 895. 14 g/d,最小值为 47. 10 g/d; MRE 平均值为 3. 78%,最大值为 6. 83%,最小值为 0. 34%。在打开风机情况下 SVM 预测模型平均值波动幅度为 10. 85 g/d,二氧化碳平

量的真实水平,且在牛舍不同环境下,SVM 预测模型稳定性更高、波动性更小。

对 2 种方法得到的奶牛个体日平均碳排放量进行统计分析,如表 5 所示。基于 SVM 模型预测值与二氧化碳平衡法测算值的 MAE 平均值为 2 202. 10 g/d,最大值为 3 805. 08 g/d,最小值为 288. 02 g/d; MRE 平均值为 8. 55%,最大值为 15. 78%,最小值为 1. 03%。在打开风机情况下 SVM 预测模型平均值波动幅度为 255. 35 g/d,二氧化碳平衡法波动幅度为 1 464. 10 g/d。结果表明,与二氧化碳平衡法相比,SVM 预测模型能够准确地反映牛只瘤胃碳排放量的真实水平,且在牛舍不同环境下,SVM 预测模型稳定性更高、波动性更小。

表 4 奶牛个体日平均 CH₄排放量及误差分析

Tab.4 Daily average methane emissions and error analysis of cattle individuals

指标	日期						
	3. 25	3. 26	3. 27	3. 28	3. 29	3. 30	3. 31
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	493. 63	491. 47	500. 94	466. 79	464. 63	462. 00	469. 89
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	421. 35	436. 99	476. 72	383. 50	425. 02	428. 55	478. 15
MAE/(g·d ⁻¹)	72. 28	54. 48	24. 22	83. 29	39. 61	33. 45	8. 26
MRE/%	17. 15	12. 47	5. 08	21. 72	9. 32	7. 81	1. 73

指标	日期						
	4. 1	4. 2	4. 3	4. 4	4. 5	4. 6	4. 7
SVM 模型预测值(g·d ⁻¹)	481. 02	479. 75	476. 68	482. 31	474. 23	464. 98	473. 63
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	503. 84	413. 62	429. 25	407. 93	419. 56	395. 45	401. 97
MAE/(g·d ⁻¹)	22. 82	66. 13	47. 43	74. 38	54. 67	69. 53	71. 66
MRE/%	4. 53	15. 99	11. 05	18. 23	13. 03	17. 58	17. 83

指标	日期						
	4. 8	4. 9	4. 10	4. 11	4. 13	4. 14	4. 15
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	466. 77	472. 66	463. 87	467. 41	474. 51	465. 88	471. 37
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	415. 81	436. 22	366. 87	394. 65	381. 50	399. 64	388. 72
MAE/(g·d ⁻¹)	50. 96	36. 44	97. 00	72. 76	93. 01	66. 24	82. 65
MRE/%	12. 26	8. 35	26. 44	18. 44	24. 38	16. 57	21. 26

表 5 奶牛个体日平均碳排放量及误差分析

Tab.5 Daily average carbon emissions and error analysis of cattle individuals

指标	日期						
	3. 25	3. 26	3. 27	3. 28	3. 29	3. 30	3. 31
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	28 826. 10	28 809. 27	29 182. 59	28 097. 37	28 047. 15	27 903. 36	28 181. 08
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	26 221. 75	26 866. 78	28 320. 88	25 551. 46	26 227. 73	26 742. 81	27 893. 06
MAE/(g·d ⁻¹)	2 604. 35	1 942. 49	861. 71	2 545. 91	1 819. 42	1 160. 55	288. 02
MRE/%	9. 93	7. 23	3. 04	9. 96	6. 94	4. 34	1. 03

指标	日期						
	4. 1	4. 2	4. 3	4. 4	4. 5	4. 6	4. 7
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	28 479. 60	28 647. 41	28 564. 11	28 652. 88	28 383. 29	28 153. 79	28 294. 42
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	28 848. 18	25 896. 31	26 450. 79	26 130. 06	26 200. 98	25 471. 46	25 485. 12
MAE/(g·d ⁻¹)	368. 58	2 751. 10	2 113. 32	2 522. 82	2 182. 31	2 682. 33	2 809. 30
MRE/%	1. 28	10. 62	7. 99	9. 65	8. 33	10. 53	11. 02

指标	日期						
	4. 8	4. 9	4. 10	4. 11	4. 13	4. 14	4. 15
SVM 模型预测值/(g·d ⁻¹)	28 132. 74	28 385. 65	27 924. 12	28 212. 69	28 367. 71	28 124. 61	28 313. 09
二氧化碳平衡法测算值/(g·d ⁻¹)	25 869. 63	26 794. 24	24 119. 04	25 304. 74	24 954. 62	25 528. 24	25 298. 13
MAE/(g·d ⁻¹)	2 263. 11	1 591. 41	3 805. 08	2 907. 95	3 413. 09	2 596. 37	3 014. 96
MRE/%	8. 75	5. 94	15. 78	11. 49	13. 68	10. 17	11. 92

4 结论

(1)设计了一种奶牛个体瘤胃碳排放量在线检测装备,实现了奶牛个体身份信息识别、瘤胃 CO₂和 CH₄气体浓度在线检测,以及采集信息的实时显示、查询、分析与记录等功能,具有检测准确、运行稳定、操作简单等特点。

(2)提出了一种 SVM 奶牛个体碳排放量预测模型,采用高斯函数作为核函数,利用网格搜索法进行参数优化,以 5 倍交叉验证均方差作为模型性能

评估指标。结果表明,CO₂排放量和 CH₄排放量预测模型交叉验证均方差最小值分别为 9.52×10^{-6} 和 9.08×10^{-4} ,表明预测模型具有较高的准确性和可靠性。

(3)与二氧化碳平衡法相比,基于 SVM 的奶牛个体瘤胃碳排放预测系统的奶牛个体 CO₂排放量、CH₄排放量、碳排放量 MAE 平均值分别为 511.13、58.16、2 202.10 g/d;MRE 平均值分别为 3.78%、14.34%、8.55%。其中,在打开风机情况下,SVM 模型预测奶牛个体平均 CO₂排放量、CH₄排放量、碳

排放量波动幅度分别为 10.85、8.15、255.35 g/d,均显著低于二氧化碳平衡法对应差值。表明该 SVM 预测模型能够准确地反映奶牛个体瘤胃碳排放的真实水平,且在牛舍不同运行环境中,能有效克服通风条件变化带来的干扰,为实现精准、稳定的碳排放检测提供了可行的解决方案。

参 考 文 献

[1] 刁其玉,董利峰,屠焰,等.反刍动物温室气体排放量化及减排措施研究进展[M].北京:中国农业科学技术出版社,2021.

[2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Methane emissions in livestock and rice systems: sources quantification mitigation and metrics[M/OL]. Rome,2023. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>.

[3] 汪开英,李鑫,陆建定,等.碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J].农业工程学报,2022,38(1):230-238.
WANG Kaiying, LI Xin, LU Jianding, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(1):230-238. (in Chinese)

[4] 贾鹏,董利锋,屠焰,等.间接法测定反刍动物甲烷排放量的研究进展[J].动物营养学报,2021,33(9):4839-4847.
JIA Peng, DONG Lifeng, TU Yan, et al. Advancements in indirect methods for measuring methane emission from ruminants[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021,33(9):4839-4847. (in Chinese)

[5] 叶岩,祝天宇,吴泽全,等.反刍动物甲烷排量监测技术应用研究进展[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):277-292.
YE Yan, ZHU Tianyu, WU Zequan, et al. Research progress on application of methane emission monitoring technology in ruminants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp.1):277-292. (in Chinese)

[6] 张相伦,刘基伟,赵红波,等.饲料粗蛋白质水平对草原红牛呼吸代谢、养分表观消化率和血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2021,33(12):6833-6842.
ZHANG Xianglun, LIU Jiwei, ZHAO Hongbo, et al. Effects of dietary crude protein levels on respiration metabolism, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indices of steppe red cattle[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12):6833-6842. (in Chinese)

[7] 毛宏祥,高凤仙,王敏,等.肉牛胃肠道甲烷排放模型估算精度的评估分析[J].畜牧兽医学报,2017,48(4):690-698.
MAO Hongxiang, GAO Fengxian, WANG Min, et al. Evaluating the accuracy of models to predict enteric methane emissions in beef cattle[J]. Acta Veterinaria Et Zootechnica Sinica, 2017,48(4):690-698. (in Chinese)

[8] 李斌昌.日粮精粗比对不同月龄后备奶牛甲烷排放与生长性能和营养物质消化的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
LI Binchang. Effects of the ratios of concentrates to roughages on methane emission, growth performance and nutrient digestion of replacement heifers at different ages[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[9] 王贝.饲料NDF/NFC对不同泌乳阶段奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响[D].阿拉尔:塔里木大学,2019.
WANG Bei. Effects of dietary NDF/NFC on rumen methane emissions, nutrient apparent digestibility and production performance of dairy cows during different lactating stages[D]. Aral: Tarim University,2019. (in Chinese)

[10] FERRIS C P, JIAO H P, MURRAY S, et al. Effect of dairy cow genotype and concentrate feed level on cow performance and enteric methane emissions during grazing[J]. Agricultural and Food Science ,2020, 29(2):130-138.

[11] MORRISON S J, MCBRIDE J, GORDON A W, et al. Methane emissions from grazing Holstein-friesian heifers at different ages estimated using the sulfur hexafluoride tracer technique[J]. Engineering,2017,3(5):753-759.

[12] SCHMITHAUSEN A J, SCHIEFLER I, TRIMBORN M, et al. Quantification of methane and ammonia emissions in a naturally ventilated barn by using defined criteria to calculate emission rates[J]. Animals, 2018, 8(5):75.

[13] ZOU B, SHI Z, DU S. Gases emissions estimation and analysis by using carbon dioxide balance method in natural-ventilated dairy cow barns[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(2):41-47.

[14] ALEMU A W, VYAS D, MANAFIAZAR G, et al. Enteric methane emissions from low-and high-residual feed intake beef heifers measured using GreenFeed and respiration chamber techniques[J]. Journal of Animal Science, 2017,95:3727-3737.

[15] HAMMOND K J, HUMPHRIES D J, CROMPTON L A, et al. Methane emissions from cattle: estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer[J]. Animal Feed Science and Technology, 2015, 203:41-52.

[16] 贾鹏. 荷斯坦泌乳牛的甲烷排放特征及减排调控的机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2023.
JIA Peng. Characteristics and regulation of enteric methane emissions from lactating Holstein dairy cows[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2023. (in Chinese)

[17] WAGHORN G C, JONKER A, MACDONALD K A. Measuring methane from grazing dairy cows using GreenFeed[J]. Animal Production Science, 2016, 56(3):252-257.

[18] HUHTANEN P, CABEZAS-GARCIA E H, UTSUMI S, et al. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions[J]. Journal of Dairy Science,2015, 98(5):3394-3409.

735,744. (in Chinese)

[20] 肖正明,段俊杰,周川,等. 考虑连杆和关节柔性的工业机器人大臂静动态性能优化[J]. 农业机械学报,2024,55(7): 449 – 458.
XIAO Zhengming, DUAN Junjie, ZHOU Chuan, et al. Optimization of static and dynamic performance of industrial robot forearm considering flexibility[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):449 – 458. (in Chinese)

[21] EDEN J, SONG C, TAN Y, et al. CASPR – ROS: a generalised cable robot software in ROS for hardware[J]. Mechanisms and Machine Science, 2018, 53: 50 – 61.

[22] DEKKER R, KHAJEPOUR A, BEHZADIPOUR S. Design and testing of an ultra-high-speed cable robot[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2006, 21(1): 25 – 34.

[23] BEHZADIPOUR S, KHAJEPOUR A. A new cable-based parallel robot with three degrees of freedom[J]. Multibody System Dynamics, 2005, 13(4): 371 – 383.

[24] ZHANG Z, SHAO Z, WANG L, et al. Optimal design of a high-speed pick-and-place cable-driven parallel robot[J]. Mechanisms and Machine Science,2018,53: 340 – 352.

[25] ZHU W, LIU J, SHI K,et al. Optimization design and dynamic stability analysis of 3-DOF cable-driven parallel robot with an elastic telescopic rod[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022,36(9):4735 – 4746.

[26] LIU F, HUANG H, LI B, et al. Design and analysis of a cable-driven rigid-flexible coupling parallel mechanism with variable stiffness[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 104030.

[27] LIU S, MEI J, WANG P, et al. Optimal design of a coupling-input cable-driven parallel robot with passive limbs based on force space analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 184: 105296.

~~~~~

(上接第 396 页)

[19] 李弘振,赵凯旋,赫永康. 基于遥感的奶牛养殖场甲烷检测系统研发[J]. 华南农业大学学报,2024,45(5):772 – 781.  
LI Hongzhen, ZHAO Kaixuan, HE Yongkang. Development of methane detection system for dairy farms based on remote sensing[J]. Journal of South China Agricultural University,2024,45(5):772 – 781. (in Chinese)

[20] D'URSO P R, ARCIDIACONO C, CASCON E G. Ammonia and greenhouse gas distribution in a dairy barn during warm periods[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(3): 428 – 441.

[21] ZHU Z, DONG, ZHOU Z. Ammonia and greenhouse gas emissions from a dairy cattle barn with a daily manure collection system[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(5):1959 – 1964.

[22] RENAND G, VLINET A, DECRUYENAERE V, et al. Methane and carbon dioxide emission of beef heifers in relation with growth and feed efficiency[J]. Animals, 2019, 9(12): 1136.

[23] RYAN C V, PABIOU T, PURFIELD D C, et al. Phenotypic relationship and repeatability of methane emissions and performance traits in beef cattle using a GreenFeed system[J]. Journal of Animal Science, 2022,100(12):1 – 13.

[24] BECK M R, THOMPSON L R, JARRETA P, et al. Recommendations on visit duration and sample number requirements for an automated head chamber system[J]. Journal of Animal Science, 2024,102(158):1 – 10.

[25] 韩雨润,史远刚,康晓龙. 奶牛反刍行为影响因素及其智能化监测方法的应用[J]. 中国畜牧兽医,2025,52(4):1554 – 1566.  
HAN Yurun, SHI Yuangang, KANG Xiaolong. Influencing factors of ruminating behavior and the application of intelligent monitoring methods in dairy cows[J]. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2025,52(4):1554 – 1566. (in Chinese)

[26] 沈维政,张爱静,张宇. 奶牛反刍研究进展[C]//中国畜牧兽医学会信息技术分会. 中国畜牧兽医学会信息技术分会第十二届学术研讨会论文集,2017:55 – 64.