

可穿戴生物感知的肉羊运输应激特征参数提取与建模

马瑞芹<sup>1</sup> 张梦杰<sup>2</sup> 于瑞航<sup>2</sup> 崔 衍<sup>2</sup> 王 想<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学模式动物重大设施建设办公室, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 传统的肉羊应激反应检测方法多采用静态采血化验法,在动物养殖运输过程中无法做到实时且连续地检测,为此设计了适用于肉羊运输过程中的可穿戴生物与环境信号的动态检测装置,利用脉搏波传感器和红外温度传感器获取肉羊运输过程中的心率和体温,采用时域分析方法提取肉羊运输应激特征参数中5个典型特征参数,并对其进行特征分析。特征参数MR、SDNN、RMSSD、pNN50、CV随运输时间的延长呈增加趋势,并且由于道路的变化而具有随机性,证明了运输应激的变化;基于专家经验与有监督的机器学习方法构建肉羊运输过程应激状态预测模型,模型的平均预测准确率在89.81%以上。结果表明,本文设计的可穿戴生物感知装置,能够有效地识别出运输应激状态,实现肉羊运输应激分级预测管理机制,解决了肉羊运输监管与品控等问题。

**关键词:** 可穿戴; 生物感知; 肉羊运输; 应激检测; 特征提取

中图分类号: S80      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)10-0291-09      OSID: 

Feature Parameter Extraction and Modeling of Stress Response Based on Wearable Biosensing for Mutton Sheep Transportation

MA Ruiqin<sup>1</sup> ZHANG Mengjie<sup>2</sup> YU Ruihang<sup>2</sup> CUI Yan<sup>2</sup> WANG Xiang<sup>2</sup>

(1. National Research Facility for Phenotypic and Analysis of Model Animals, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

**Abstract:** The traditional detection methods of stress response of mutton sheep focus on the static blood test method, which cannot achieve real-time and continuous detection in the process of animal farming and transportation. A set of devices for dynamic detection of wearable biological and environmental signals in the process of mutton sheep transportation was designed. The heart rate and body temperature of mutton sheep during transportation were obtained by pulse wave sensor and infrared temperature sensor. The time domain analysis method was used to extract five typical characteristic parameters of transport stress characteristic parameters of mutton sheep, and their characteristics were analyzed in detail. The characteristic parameters MR, SDNN, RMSSD, pNN50 and CV tended to increase with the extension of transportation time, and were random due to changes in roads, which proved the changes in transportation stress. The average prediction accuracy of the stress state prediction model based on expert experience and supervised machine learning method was more than 89.81%. The results showed that through the development of wearable biosensing devices the pulse wave and body temperature can be monitored and the characteristic parameters of transport stress of mutton sheep can be extracted. The three states of transport stress can be effectively identified, the classification prediction management mechanism of transport stress of mutton sheep can be realized, and the problems such as low efficiency of transport supervision and quality control of mutton sheep can be solved.

**Key words:** wearable; biosensing; mutton sheep transportation; stress detection; feature extraction

收稿日期: 2021-06-25    修回日期: 2021-07-24

基金项目: 国家重点研发计划——政府间国际合作项目(2017YFE0111200)

作者简介: 马瑞芹(1978—),女,高级工程师,主要从事农村建筑与农业生物环境工程研究,E-mail: maruiqin@cau.edu.cn

通信作者: 王想(1990—),女,讲师,博士,主要从事物联网与农业信息化研究,E-mail: wxzrjj@cau.edu.cn

0 引言

活羊运输是肉羊产业中较为重要的环节,而运输应激严重威胁了活羊的机体健康以及羊肉品质。当羊群运输超过 50 km,路途颠簸、肉羊站立不稳、践踏等现象将诱发肉羊产生应激,应激率高达 30% ~ 98.3%,会导致活羊免疫力下降,容易感染急性应激综合征 (Acute stress syndrome, ASS) 甚至猝死综合征 (Sudden death syndrome, SDS)<sup>[1-5]</sup>。随着活羊心率和乳酸的升高,产热量、耗氧量上升,肉羊的生理机能改变,导致屠宰后羊肉品质下降、肉色变异甚至出现白肌肉现象<sup>[6-9]</sup>。因此,如何有效地动态监测肉羊运输过程,提取应激特征参数,建立应激状态预测模型,成为肉羊保活物流的关键问题。

传统的活体动物运输应激检测方法主要是静态采血化验法,检测设备功耗高不易携带,无法做到实时且连续地检测<sup>[10-15]</sup>;现有的动态检测方法更多是基于环境信号,且更多关注的是环境和湿度,无法直接对活羊生理状态进行实时检测<sup>[16-21]</sup>。可穿戴生

理感知技术采用生物传感器获取人体生理参数,如心率、血压、体温、呼吸频率和血糖等指标的监测,为获取活羊运输过程中实时生理信息提供了技术支持,具有低功耗、操作简便、可移动、持续性监测、无线传输和异常生理状况报警等特性<sup>[22-29]</sup>。

因此,本研究选取湖羊为研究对象,设计面向肉羊运输过程的可穿戴生物感知装置,动态获取肉羊运输过程中的心率和体温,提取应激特征参数,构建应激状态预测模型,形成一套具有“参数监测-特征提取-状态预测”功能的肉羊运输应激动态检测系统,解决肉羊运输监管与品质控制等问题。

1 肉羊运输应激的信号检测装置设计与建模

1.1 应激参数感知机理

肉羊运输应激参数动态关系如图 1 所示,肉羊运输应激由应激源产生生物信号从而影响肉羊的生理状态,肉羊运输应激源产生的关键信号主要包括环境中的微环境信号、运输振动拥挤等物理信号和肉羊自身的心率、血糖、血压生理信号。本文选取体

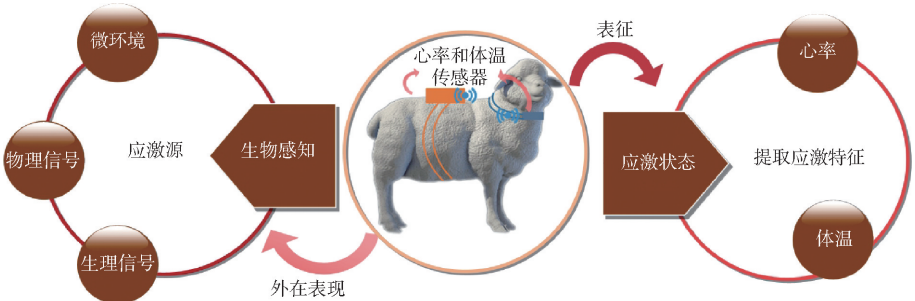


图 1 肉羊运输应激参数感知机理动态关系图

Fig. 1 Perception mechanism diagram of transport stress parameters of live sheep

温和心率来表征肉羊运输应激状态。

传统的心电图测量方法存在一定的局限性,通常需要 3 个电极附着在特定的身体部位,限制了被测活体动物的活动,使被测者感到不适。光电容积脉搏波描记法 (Photo plethysmo graphy, PPG) 通过血管脉动引起的羊组织不同透光率来测量脉搏和血氧饱和度,制作成本较低的光学测量脉搏波信号技术,是一种非侵入、无创式的心率检测方法,可以应用于任何含有动脉血的组织部位<sup>[30-32]</sup>。该光电传感器由光源和光电变换器两部分组成,通过捆绑带或夹子固定在活羊脖子下面裸露的皮肤上。光源通常使用特定波长的发光二极管,这些发光二极管对动脉血中的氧合血红蛋白 (HbO2) 和血红蛋白 (Hb) 具有选择性。当光束通过羊体表皮外周血管时,光束的透光率随动脉搏动充血体积的变化而发生变化。此时,被肉羊皮肤组织反射的光被光电转换器接收转换成电信号,放大并传送到控制器中。脉冲是随着

心脏跳动周期性变化的信号,动脉血管的体积也周期性变化,光电传感器的电信号变化周期即是心率。通过测量血液中血红蛋白随心跳的吸氧变化来测量肉羊脉搏波参数。该方法具有响应速度快、性能稳定、适应性强等特点。

1.2 检测装置设计与开发

肉羊运输关键参数检测装置的主从传感器节点框架如图 2 所示,包括主传感器节点和从传感器节点,从传感器节点包含一个 8 位 AVR 微控制器 (ATmega328P 型,微芯科技有限公司,美国)、射频收发器 CC2540、脉搏波传感器和红外温度传感器,部署在湖羊的脖颈内侧并固定。主传感器节点包括 AVR 微控制器 (ATmega2560P,微芯科技有限公司,美国)、射频收发器 CC2540、Micro SD 卡、GPS、三轴加速度传感器,温度传感器、湿度传感器安置在湖羊背部并固定。实地运输时,从属端传感器节点实时感知肉羊生命体征信号的动态波动,而主端传感器

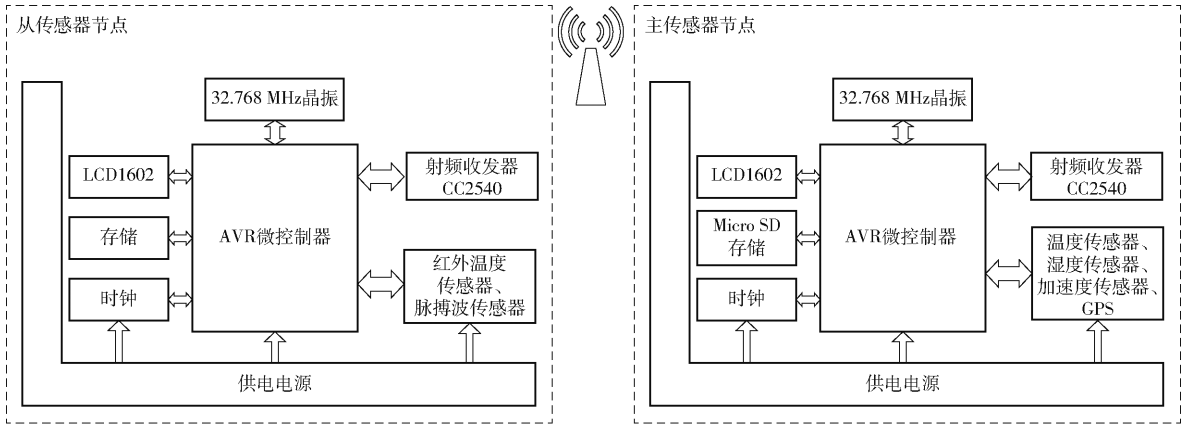


图 2 检测装置的主从传感器节点框架

Fig. 2 Master-slave sensor node frame of detection device

节点汇聚接收来自于从属端传感器节点连续实时获取的生命体征信号,结合自身获取到的环境传感信号一起本地保存并发送到远程监控端。

脉搏波传感器使用峰值波长为 515 nm 的绿色发光二极管芯片 (Kingbright, AM2520),而光接收器使用峰值波长为 565 nm 的芯片 (Avago, APDS - 9008),适用于脉搏波形检测和肉羊运输应激特征参数分析的光电反射模拟传感器芯片。传感器本身集成了完整的发光 LED 及驱动部分、光感应和 AD 转换部分、环境光干扰消除及数字滤波部分以及数字接口输出。单片机通过硬件 I<sup>2</sup>C 或者模拟 I<sup>2</sup>C 接口来读取传感器信号。脉冲信号的频带通常在 0.05 ~ 200 Hz 范围内,其感知信号的幅度变化非常小,通常在毫伏水平,通过低通滤波器以及运算放大器 MCP6001 将脉搏波信号放大了 330 倍,通过分压电阻设计将 DC 偏置电压调整为电源输入电压的 1/2,使得单片机能够更好地采集放大后的脉搏波信号<sup>[31]</sup>。将其戴在羊的后颈、耳部和其他与皮肤接触的部位,通过有线通信连接,可以将脉搏模拟信号发送到 Arduino 单片机内,经过模数转换器转换成数字信号。表 1 为主从传感器节点主要元器件型号及相关参数。

表 1 主从传感器节点主要元器件型号及相关参数

Tab. 1 Type and related parameters of sensor nodes components

| 元器件         | 型号          | 功耗/mW          | 成本/元  |
|-------------|-------------|----------------|-------|
| 控制器<br>(主端) | ATmega2560P | 300 ~ 500      | 30    |
|             |             | 10 ~ 20        |       |
| 控制器<br>(从端) | Atmega328P  | 300 ~ 500      | 12. 5 |
|             |             | 10 ~ 20        |       |
| 蓝牙 v4. 0    | CC2540      | 0. 251 ~ 2. 51 | 10    |
| 脉搏波传感器      | APDS - 9008 | 20             | 11    |
| 红外温度传感器     | MLX90615    | 7. 5           | 35    |
| GPS 定位      | u - blox 6  | 360 ~ 500      | 45    |
| 3D 打印外壳     | 光敏树脂        |                | 10    |

1. 3 活羊运输过程应激特征参数提取方法

对于肉羊运输应激特征参数的研究首先从心脏结构以及心脏跳动规律入手。正常肉羊脉搏波 (PPG) 信号波形如图 3 所示,其中 PPG 为心脏跳动而产生的脉搏波信号,每个心动周期包括 P、QRS、T 波。QRS 波群中的 R 波波形陡峭且具有高振幅,通常用作脉搏波特征检测的标记特征。两个相邻 R 波之间的时间间隔定义为 R 间隔,用于指示心脏连续跳动的时间间隔<sup>[33]</sup>。连续心跳之间的 R 间隔的变化表示肉羊运输应激特征参数。肉羊运输应激特征参数的分析方法基于 R 间隔测量。VPG (Velocity plethysmo graph) 为脉搏波的一次微分波形,APG (Accelerated plethysmo graph) 是脉搏波的二次微分波形<sup>[34]</sup>。PPG 脉搏波检测波形图如图 3 所示。

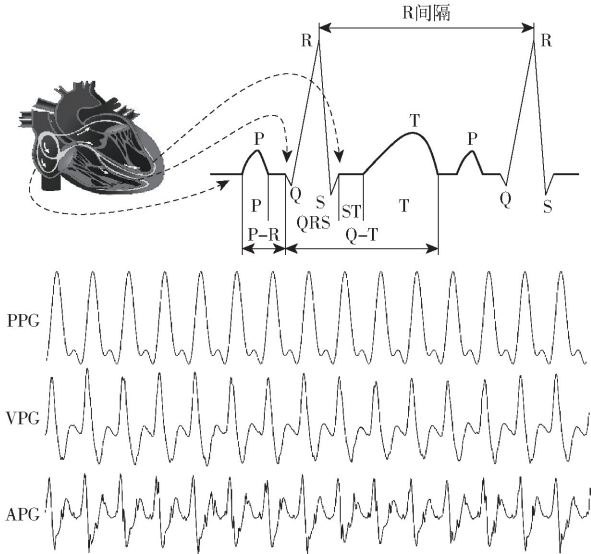


图 3 PPG 脉搏波检测波形图

Fig. 3 PPG pulse wave detection waveform

本文选择了 5 个肉羊运输应激特征参数<sup>[35 - 36]</sup>作为评价指标,分别为平均值 (MR)、标准偏差 (SDNN)、平方和均方根 (RMSSD)、RR 间隔数量 (pNN50) 和变异系数 (CV)。5 个指标反映了肉羊

运输应激的不同特征。SDNN 用于评估肉羊运输应激特征的整体变化。RMSSD 反映了肉羊运输应激特征参数的快速变化分量,它与频谱中的高频分量有关。RR 间隔数量反映了心跳周期变化。CV 表示肉羊运输应激特征变异程度。

1.4 肉羊运输应激状态预测模型

1.4.1 肉羊运输应激状态等级量化

通过在内蒙古、青海、辽宁以及河南等省区进行多次实地调研,获得了肉羊在运输过程中的外在表现应激状态信息。参照卡罗林斯卡嗜睡量表

(Karolinska sleepiness scale)的评分方法<sup>[37]</sup>,将整体压力水平分为7个等级:非常警觉、相对警觉、有点警觉、没有影响、有点疲劳、相对疲劳、非常疲劳,相应得分为-3、-2、-1、0、1、2、3,而各个应激状态等级相应的外在生物表观特征如表2所示。养殖户或牧民可以根据肉羊在运输过程中表现的应激状态,结合各应激等级的外在生物表观特征,初筛较为相符的总体应激程度,若要准确判断则由专业工具检测结果得出每个时段的总体应激程度等级。

表 2 肉羊运输应激状态特征表  
Tab.2 Characteristics of transport stress state of mutton sheep

| 应激等级 | 得分 | 应激状态特征                                                  | 应激状态水平  |
|------|----|---------------------------------------------------------|---------|
| 非常警觉 | -3 | 嚎叫、咆哮,意识非常清晰,精神振奋,愉悦,动作迅速,姿势畏缩蹲伏,注意力高度集中,害怕,进攻性强,乱挤     | 应激 2 级  |
| 相对警觉 | -2 | 短促尖叫、长声尖叫,意识清晰,眼球状态更加活跃,注意力更加集中,动作完成更快,姿势放松,反复站起躺下、转圈   |         |
| 有点警觉 | -1 | 呻吟声,意识清晰,精神可以集中,姿势开始倾斜,躲藏                               | 中间态 3 级 |
| 没有影响 | 0  | 安静、偶尔有叫声,保持注意力,无疲劳症状,无睡意,蹲伏                             | 舒适 1 级  |
| 有点疲劳 | 1  | 吱吱叫,头部和腿部动作,打哈欠,摆动头部,调整姿势,轻微困倦                          | 中间态 3 级 |
| 相对疲劳 | 2  | 呜咽声,眼睛活动较少,眼睑开始出现闭眼趋势,打哈欠变得频繁,调整姿势频率增加,困倦               | 应激 2 级  |
| 非常疲劳 | 3  | 呼噜声,眼睑表现出明显的闭眼趋势,困倦,目光呆滞,耐疲劳动作如点头、摇头,非常困,努力克服困倦,甚至失神,躺卧 |         |

表2中有关压力相关症状的描述方法来自于日本疲劳研究协会发表的大岛正树疲劳症状分类表<sup>[37]</sup>。表2只是将疲劳症状初步划分为3类:身体疲劳、精神疲劳和神经感觉疲劳。而其中每类具有6~10个具体症状,每个症状又划分为5个级别:无、轻微、中等、严重和非常严重。其生物表观相对应的分值为0、1、2、3、4。受试者与专业医师可以根据其在每个阶段的感受和疲劳症状进行记录分析。研究表明,表2在活羊运输过程中依然具有信度和效度。

参照专家经验的知识规则库对运输应激状态的划分,结合实验中的应激检测结果,将肉羊的应激状态分为3个水平,即舒适1级、应激2级和中间态3级,分别对应类别标签1、2、3。对照表2,舒适1级得分为0;应激2级得分为-3、-2、2、3;中间态3级得分为-1、1。

1.4.2 基于支持向量机的肉羊运输应激状态预测模型

基于支持向量机原理建立肉羊运输应激状态预测模型的过程包括3个典型步骤<sup>[38]</sup>:①算法模型输入变量的选取阶段,将脉搏波信号、肉羊运输应激特征参数和体温特征参数共同作为输入集,并将300组数据按照7:3分为211组训练集与89组测试集。

②模型训练阶段,根据需求调整核函数,采用不同算法来优化模型运行所需的模型调优参数,算法模型经过211组数据的训练即可得到相应的运输应激状态预测模型。③模型测试阶段,使用余下的89组测试集对建立的运输应激状态预测模型进行准确性测试。

部分特征参数由于量纲不同导致数据差异性过大,如参数MR在400~700之间,而参数RMSSD一般在1~9之间,两者在数量级上差别很大。并且量级大的特征参数会凸显自身的作用和贡献,导致量级小的特征参数被忽视,除此之外还会消耗更多的算力。因此在模型参数输入前需要对特征参数进行归一化(Normalization),这样在使用梯度下降求解最优化问题时,可以加快梯度下降的求解速度,即提升模型的收敛速度并且使得应激预测模型的状态分类准确率显著提高。

2 试验方案

本研究针对应激感知的可穿戴生物感知传感器,通过无损安装方式,依据不可见光感应材料与皮肤中的应激因子发生光学反射反应产生微弱电信号,并通过信号放大器放大处理后将有效信息进行波形抽取与特征参数估计得到稳定准确的生物感知信号,为进一步试验做准备。

2.1 试验肉羊的筛选与初始应激程度标记

在江苏省盐城市购买了 60 只同期发情并且生物机体条件（年龄、体质量、品种和毛密度）几乎相同的雄性湖羊作为试验对象。选择 10 只雄性湖羊（占总数的 16.7%）作为肉羊运输应激测试的试验用羊。每只试验肉羊之前均未用卡车运输过。考虑到疾病等外部条件对肉羊运输应激特征参数的干扰影响,所有试验肉羊皆通过兽医全面诊断确认为机体健康且没有心血管和脑血管等疾病。在测试前需要保证试验肉羊充足睡眠,且不能疲劳,情绪稳定。试验前不喂食含有咖啡因、酒精和其他影响血压和心率的饲料或药物。在专业兽医的协助下,成功标记了 500 组试验数据的应激程度标签。

2.2 检测装置安装与供应链跟踪

实地跟踪朝阳市到赤峰市短途肉羊供应链,运输前把设计的主从端传感器节点按计划布置（图 4）,从传感器节点部署在湖羊的脖颈内侧并固定,主传感器节点安置在湖羊背部并固定;实地运输时,从端传感器节点实时感知肉羊生命体征信号的动态波动。主端传感器节点汇聚接收来自从端传感器节点实时获取的生命体征信号,与其获取到的环境传感信号一起保存并发送到远程监控端。

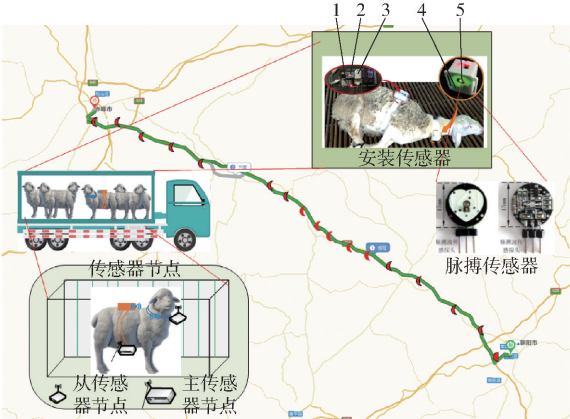


图 4 肉羊运输关键参数的信号获取装置总体设计

Fig. 4 Design of signal acquisition device for key parameters of meat sheep transportation

1. 存储卡 2. GPS 3. 温度传感器 4. 湿度传感器 5. 脉搏传感器

3 试验结果与分析

3.1 肉羊运输应激特征参数分析

肉羊运输过程中心率和体温的变化曲线如图 5 所示。肉羊在运输过程中的心率与温度呈一定程度的相关性,尤其在初始阶段,肉羊的心率和体温整体呈现上升趋势,在运输中期肉羊心率和体温整体呈现稳定状态,到运输末期,肉羊中心率仍然显著增高,但体温不再继续增高。

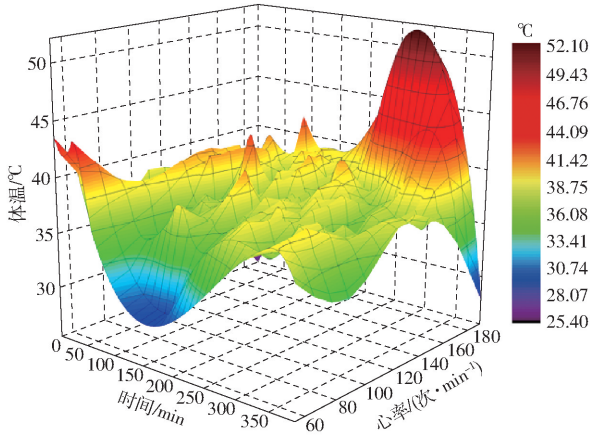


图 5 体温和心率随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of temperature and heart rate of mutton sheep

为了更详细地分析肉羊运输过程应激反应,选择肉羊运输应激特征参数的 5 个时域特征（MR、SDNN、RMSSD、pNN50、CV）来描述肉羊在运输过程中的应激状态。在运输前,肉羊得到正常休息与喂养,并且提前经过化验没有明显的应激症状。运输 120 min 后,肉羊出现应激反应,经常出现眼睑闭合、眼睛用力挤压、摇头等应激现象。根据运输前后比较均值和标准差的配对  $t$  检验结果,均值和标准差在运输前后有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

将 380 min 的 PPG 数据分成 38 段,每段 10 min,记录为第 1、2、...、38 期,获得每个时间段的 MR、SDNN、RMSSD、pNN50、CV 值。使用 Kolmogorov - Smirnov 方法测试了第 1 期至第 38 期 5 个指标的正态性检验,在 0.05 的显著概率下,5 个特征都显著地服从正态分布群体 ( $P > 0.05$ )。

从图 6 可以看出,时域分析指标 MR、RMSSD、pNN50 在运输过程中随运输时间的增加逐渐上升,说明在运输过程中肉羊 RR 间的均值与心跳的变化逐渐增加。与初始时刻相比,肉羊在载羊货车运输时因路况环境复杂,外部刺激负荷较大,心跳频率加快。之后肉羊逐渐适应了运输过程,随着速度的增加和斜率的增大,RR 间的平均值增大。随着运输过程变得越来越稳定,MR 的变化幅度放缓,由于应激反应的出现,RR 间的均值逐渐增加。

相较于其他时域指标,RMSSD 可以清楚地表现出肉羊运输应激程度的渐变过程,二者成正比。RMSSD 在运输过程中逐渐上升,说明肉羊在货车上的应激程度正在加快变化。RMSSD 在运输初期的波动很大,主要原因可能为肉羊刚经过装载上车,心理紧张,导致 RMSSD 曲线不稳定;后续运输过程中肉羊对运输条件逐渐适应,心理紧张逐渐缓解,RMSSD 信号逐渐稳步上升,说明肉羊开始表现出运

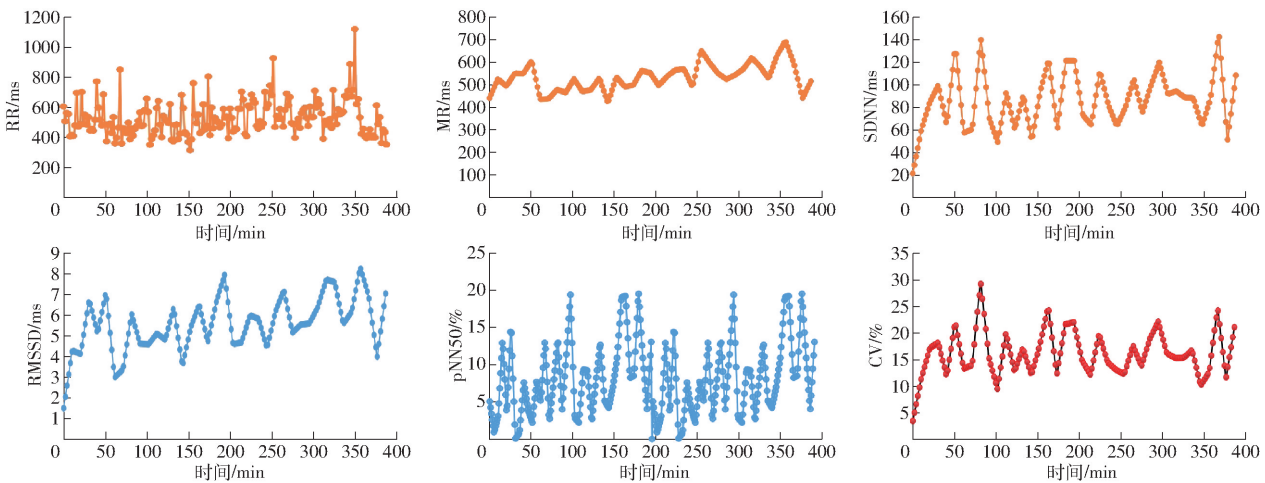


图6 时域指数变化曲线

Fig. 6 Changing curves of time-domain characteristic parameter variation

输应激反应,并逐渐累积加深。在运输中后期RMSSD的变化逐渐平缓,说明肉羊运输应激程度正在减小,而肉羊机体则逐渐显现出抗应激性。

所有时域分析指标MR、SDNN、RMSSD、pNN50和CV都表现出一定的线性趋势,且与时间高度相关。回归分析结果表明,RMSSD曲线的斜率大于SDNN曲线斜率的绝对值,说明RMSSD增速更快,变化更明显。

从图7可以看出,提取的特征参数服从正态分布,结合图6可知,MR在第1和第2周期比较小。与未运输时相比较,当人工装载到卡车上时,肉羊心跳增加并且感到恐慌。由于逐渐适应运输环境,MR在第3至第5周期分布个数增加。当适应运输时,它显示出缓慢增加的趋势。然而,由于运输环境和道路条件不稳定,MR值没有显著波动且不稳定。SDNN能够反映肉羊的应激加深过程,SDNN在运输过程中显著上升,表明肉羊的应激水平在增加,与RMSSD相同。pNN50和CV反映了肉羊运输应激特征参数的整体变化。通过对5个时域特征的分析,得到了在运输过程中肉羊运输应激特征参数的变化特征,从而显示了运输应激的变化。

由图8的线性回归分析结果可知,MR指数与时间的皮尔逊相关系数为0.432,表明MR指数与时间呈正相关,相关度中等。SDNN指数与时间的皮尔逊相关系数为0.338,表明SDNN指数与时间的相关程度略低。RMSSD指数与时间的皮尔逊相关系数为0.595,表明RMSSD指数与时间呈正相关,相关度较强。pNN50指数与时间的皮尔逊相关系数为0.585,表明pNN50指数与时间呈正相关,相关度较强。而CV指数与时间的皮尔逊相关系数为0.114,表明CV指数与时间呈正相关,相关度较弱。5个时域指标呈现不明显的线性趋势,其线性回归

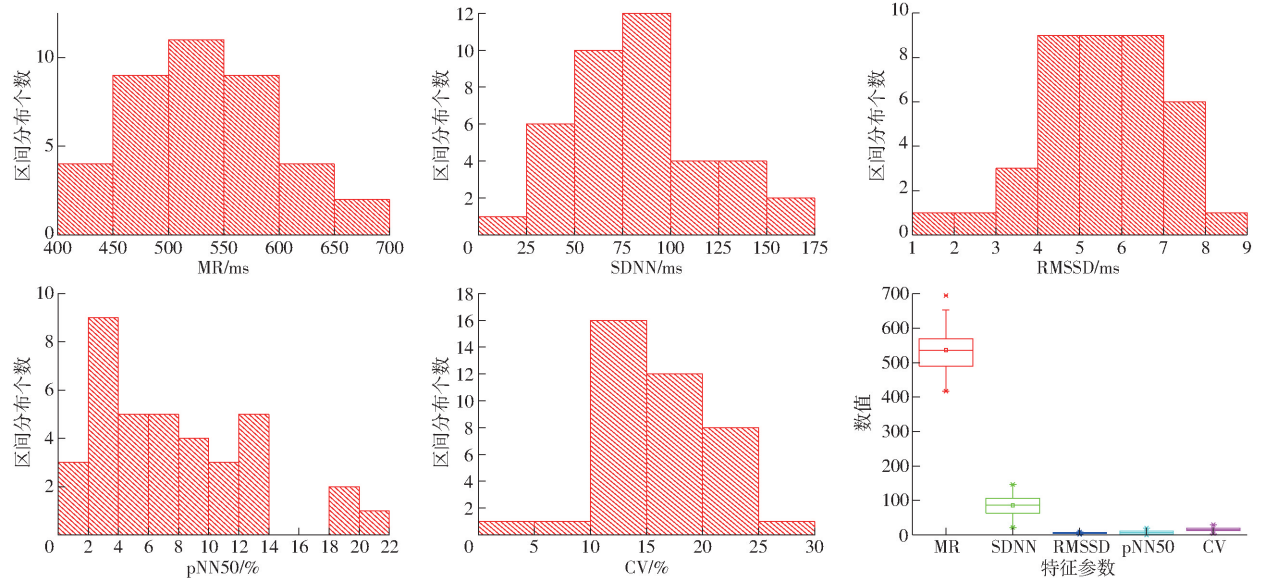


图7 时域特征正态性检验分布图

Fig. 7 Test distributions of time-domain characteristic normality

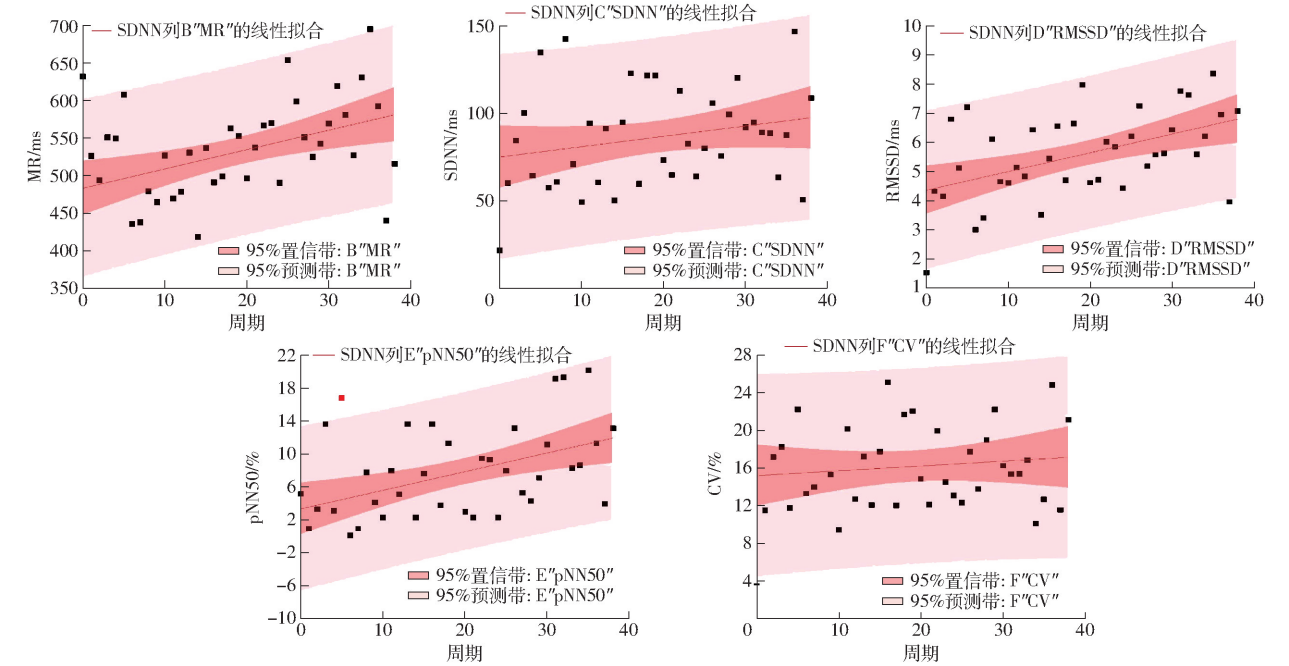


图 8 肉羊运输应激特征参数线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting results of transport stress characteristic parameters of mutton sheep

分析的显著性分析结果皆为  $P < 0.01$ , 这说明拟合方程具有一定的线性关系。该拟合回归模型可以在一定程度上定量表征 5 个时域指标的线性变化趋势。

3.2 肉羊运输过程应激状态预测模型

基于支持向量机的肉羊运输过程定态应激预测模型的输入特征参数是心率、MR、SDNN、RMSSD、pNN50、CV 以及体温, 输出变量是肉羊的应激预测状态。如图 9 所示, 采用遗传算法 (GA) 对惩罚参数  $c$  和核函数参数  $g$  进行优化, 得到最优参数解为  $c = 38.856\ 5$ 、 $g = 0.777\ 05$ , 分类准确率为 95.283%。

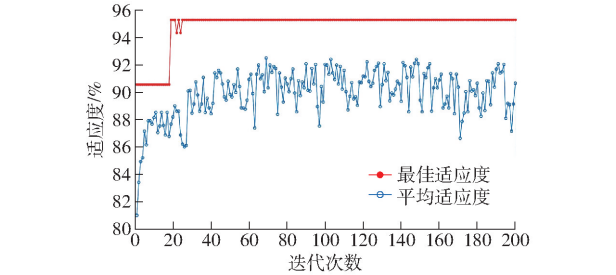


图 9 GA 优化的适应度曲线

Fig. 9 Fitness curves optimized by GA

为检测已训练好模型的准确度, 采用最优惩罚参数  $c$  和核函数参数  $g$  分别对肉羊运输应激状态预测模型进行整体性能测试。模型对测试集的分类测试结果如图 10 所示。

对测试集数据进行应激模型的性能预测, 根据模型测试结果, 参数优化前后的不同状态分类准确率如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 类别标签 1、2 的模型分类准确率较高, 而类别标签 3 存在一定误判, 模型准确率

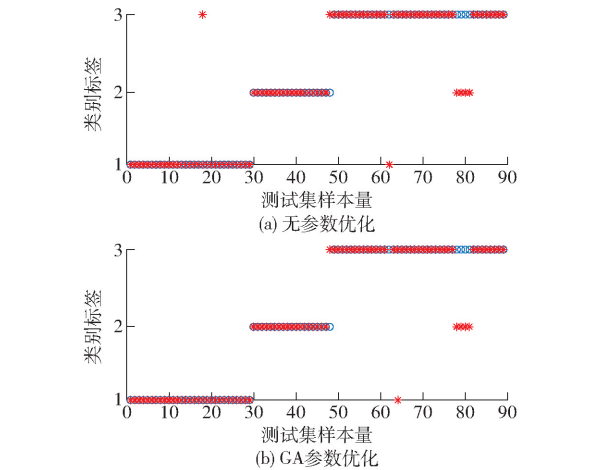


图 10 参数优化前后的测试集分类

Fig. 10 Test set classification before and after parameter optimization

表 3 参数优化前后不同状态分类准确率比较

Tab.3 Comparison of state classification accuracy of different algorithms for SVM optimization

| 模型类型  | 类别标签 | 准确率/<br>% | 总体准确<br>率/% | 运行时间/<br>s |
|-------|------|-----------|-------------|------------|
| 无优化   | 1    | 96.55     | 92.13       | 4.16       |
|       | 2    | 97.14     |             |            |
|       | 3    | 80.00     |             |            |
| GA 优化 | 1    | 100       | 93.26       | 14.72      |
|       | 2    | 97.14     |             |            |
|       | 3    | 80.00     |             |            |

较低。结合肉羊运输过程的实际情况进行分析, 可知 1 级和 2 级为肉羊相对较为极端的状态, 即舒适状态和确定应激状态, 由于这两种状态的肉羊脉搏

波和体温信号容易识别,所以该应激模型的识别准确率很高,但肉羊处于轻微应激状态时,此时脉搏波和体温信号变化不明显,所以整体模型的识别率也略低。并且该试验设计无法排除试验羊体之间因体质或神经差异而导致的模型误判。

通过使用脉搏波特征、体温特征以及融合特征 3 种单变量输入运输应激状态分类模型,用以验证生物感知信息融合技术是否能够改善模型对肉羊运输应激状态的预测结果,其分类结果如表 4 所示。

表 4 单一特征和融合特征模型的分类准确率  
Tab. 4 Classification accuracy of single feature and fusion feature

| 特征类型 | 测试总样 | 准确预测的 | 总体准确率/<br>% |
|------|------|-------|-------------|
|      | 本量   | 样本量   |             |
| PPG  | 89   | 78    | 87. 64      |
| 体温   | 89   | 69    | 77. 53      |
| 融合   | 89   | 83    | 93. 26      |

由表 4 可知,生物感知信号的融合特征模型识别效果比单一特征好。在肉羊运输过程中,特征融合后的应激状态预测模型的识别准确率明显高于 PPG 和体温特征的模型识别准确率,其总体准确率为 93. 26%,这表明多元融合的生物感知信号可以更准确地表现出肉羊运输应激的状态并进行状态预测。PPG 特征模型的识别准确率比体温特征模型的识别准确率高 10. 11 个百分点,这说明 PPG 信号可以表征肉羊的运输应激状态,而体温信号表征的应激状态准确性稍弱,但是也可以作

为辅助特征参数与 PPG 信号综合进行肉羊运输应激的状态预测。

生物感知信号 PPG 和体温融合特征参数能够高效分辨肉羊运输应激状态,说明通过支持向量机模型训练所构建的肉羊运输应激状态预测模型性能良好,且总体准确率较高。

4 结论

(1)针对传统的应激反应检测方法,在动物养殖运输过程中无法做到实时且连续检测的问题,本文设计了适用于肉羊运输过程中的可穿戴生物与环境信号的动态检测装置,实现了对运输过程中影响肉羊应激反应的应激特征参数、体温、环境温湿度和加速度等信息的实时获取。

(2)利用时域分析方法提取了肉羊运输应激特征参数,并对活羊运输过程中的应激状态进行分析。MR、RMSSD、pNN50 在运输过程中随运输时间的增加逐渐上升,运输初期波动较大,后续运输过程中肉羊对运输条件逐渐适应,上升趋势平缓,SDNN 在运输过程中显著上升,表明肉羊的应激水平在增加,与 RMSSD 相同,pNN50 和 CV 反映了肉羊运输应激特征参数的整体变化。

(3)构建了基于支持向量机的肉羊运输过程动态应激预测模型,参数优化后的模型对应激水平 1、2、3 的识别准确率分别为 100%、97. 14%、80. 00%,表明通过 PPG 和体温融合特征参数能够有效地识别运输中的 3 个应激水平。

参 考 文 献

[1] 张国平,赵硕,阿丽玛,等. 肉羊运输应激及其危害[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(12): 83–86.  
ZHANG Guoping, ZHAO Shuo, ALIMA, et al. Analysis on the transportation stress of mutton sheep and its harm[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2017,38(12):83–86. (in Chinese)

[2] 尚建勋,乔彦良. 商品动物运输性应激与抗应激研究进展[J]. 中国兽医科技, 1988(2): 29–31.  
SHANG Jianxun, QIAO Yanliang. Research progress on transport stress and antistress in commercial animals[J]. Chinese Journal of Veterinary Science and Technology, 1988(2): 29–31. (in Chinese)

[3] 李贤清. 口服补液盐治疗羊长途运输应激病[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2006(2): 42.  
LI Xianqing. Oral rehydration salts in the treatment of sheep long-distance transport stress disease[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2006(2): 42. (in Chinese)

[4] 杨映红. 常见羊病发病原因及防治[J]. 畜牧兽医科学(电子版), 2021(3): 82–83.  
YANG Yinghong. Causes and control of common sheep diseases[J]. Graziery Veterinary Sciences(Electronic Version), 2021(3):82–83. (in Chinese)

[5] 王德宝,王晓冬,郭天龙,等. 不同屠宰方式对蒙古羊应激及羊肉食用品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(7): 25–29.  
WANG Debao, WANG Xiaodong, GUO Tianlong, et al. Effects of different slaughter methods on stress reactions and eating quality in mongolian sheep[J]. Meat Research, 2019,33(7):25–29. (in Chinese)

[6] 李学鑫. 羊只调运应激反应的应对策略[J]. 畜牧兽医科技信息, 2019(12): 92.  
LI Xuexin. Sheep mobilize coping strategies for stress response[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019(12): 92. (in Chinese)

[7] 陆荣清,陆晓梅,张孝国,等. 山羊异地引种与应激反应处理措施[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(6): 161–162.  
LU Rongqing, LU Xiaomei, ZHANG Xiaoguo, et al. Introduction of goat and treatment measures of stress response[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, 37(6): 161–162. (in Chinese)

[8] 赵清丽. 羊应激综合症的防治[J]. 河北畜牧兽医, 2005(9): 31.  
ZHAO Qingli. Prevention and cure of sheep stress syndrome[J]. Hebei Animal Husbandry and Veterinary, 2005(9): 31. (in

- Chinese)
- [9] 李华慧,伍国荣. 引种黑山羊引起应激性疾病羊梭菌病例报告[J]. 当代畜牧, 2014(32): 51–52.  
LI Huahui, WU Guorong. A case report of the stress disease *Clostridium aureus* caused by the introduction of black goats[J]. Contemporary Animal Husbandry, 2014(32): 51–52. (in Chinese)
- [10] GRIGOR P N, COCKRAM M S, STEELE W B, et al. Effects of space allowance during transport and duration of mid-journey lairage period on the physiological, behavioural and immunological responses of young calves during and after transport[J]. Animal Science, 2001, 73(2): 341–360.
- [11] 于静静,邓咏梅. 基于生理监测的可穿戴智能服装应用与展望[J]. 纺织科技进展, 2021(2): 6–9, 15.  
YU Jingjing, DENG Yongmei. Application and prospect of wearable smart clothing based on physiological monitoring[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2021(2): 6–9, 15. (in Chinese)
- [12] 周兴悦. 便携式健康参数监测系统的研究与设计[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2020.  
ZHOU Xingyue. Research and design of portable health parameter monitoring system[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)
- [13] NGUYEN G T, SARKER V K, TCARENKO I, et al. Energy efficient wearable sensor node for IoT-based fall detection systems[J]. Microprocessors and Microsystems, 2018, 56: 34–46.
- [14] 王想,高乾钟,肖新清,等. 保活运输河蟹品质感知生物信号检测与建模[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 268–277.  
WANG Xiang, GAO Qianzhong, XIAO Xinqing, et al. Quality inspection and modeling for crab transportation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 268–277. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20201030&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201030&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.030. (in Chinese)
- [15] 孙远韬,郭晨睿,李云生,等. 一种可穿戴智能颈部治疗装置开发研究[J]. 生物医学工程学进展, 2017, 38(2): 66–68, 74.  
SUN Yuantao, GUO Chenrui, LI Yunsheng, et al. Research and development of a wearable intelligent neck treatment device[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2017, 38(2): 66–68, 74. (in Chinese)
- [16] 乔自士,沈亦豪,高瞻. 基于互联网的可穿戴脉搏监测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 102–103, 107.  
QIAO Zishi, SHEN Yihao, GAO Zhan. Design of wearable pulse monitoring system based on Internet[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(12): 102–103, 107. (in Chinese)
- [17] 王萍萍,张晴,刘燕,等. 基于TGAM模块的穿戴式脑电实时采集监护系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(7): 75–79.  
WANG Pingping, ZHANG Qing, LIU Yan. Real-time wearable EEG acquisition and monitoring system based on TGAM module[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017, 17(7): 75–79. (in Chinese)
- [18] OSTFELD A E, GAIKWAD A M, KHAN Y, et al. High-performance flexible energy storage and harvesting system for wearable electronics[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1–10.
- [19] DU Y, LIM B, CIOU W, et al. Novel wearable device for blood leakage detection during hemodialysis using an array sensing patch[J]. Sensors, 2016, 16(6): 849.
- [20] JIN H, ABU-RAYA Y S, HAICK H. Advanced materials for health monitoring with skin-based wearable devices[J]. Advanced Healthcare Materials, 2017, 6(11): 1700024.
- [21] AZIZULKARIM A H, ABDUL J M M, AMBAR R. Design and development of patient monitoring system[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 226: 012094.
- [22] GIA T N, ALI M, DHAOU I B, et al. IoT-based continuous glucose monitoring system: a feasibility study[J]. Procedia Computer Science, 2017, 109: 327–334.
- [23] SALVO P, CALISI N, MELAI B, et al. Temperature- and pH-sensitive wearable materials for monitoring foot ulcers[J]. International Journal of Nanomedicine, 2017, 12: 949–954.
- [24] SELLIER N, GUETTIER E, STAUB C. A review of methods to measure animal body temperature in precision farming[J]. American Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 2(2): 74–99.
- [25] NOGAMI H, OKADA H, MIYAMOTO T, et al. Wearable wireless temperature sensor nodes appressed to base of a calf's tail[J]. Sens. Mater, 2014, 26: 539–545.
- [26] NEETHIRAJAN S, TUTEJA S K, HUANG S, et al. Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 98: 398–407.
- [27] GARCIA S O, ULYANOVA Y V, FIGUEROA-TERAN R, et al. Wearable sensor system powered by a biofuel cell for detection of lactate levels in sweat[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2016, 5(8): 3075–3081.
- [28] CASTRO-COSTA A, SALAMA A A K, MOLL X, et al. Using wireless rumen sensors for evaluating the effects of diet and ambient temperature in nonlactating dairy goats[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(7): 4646–4658.
- [29] ALZAHAL O, ALZAHAL H, STEELE M A, et al. The use of a radiotelemetric ruminal bolus to detect body temperature changes in lactating dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 2011, 94(7): 3568–3574.
- [30] 彭福来. 基于光电容积脉搏波描记法的无创血红蛋白浓度检测技术的研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.  
PENG Fulai. Research on the technology of non-invasive hemoglobin measurement based on ohotoplethy smography[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [31] 黄军辉,黄晓红,叶廷东,等. 物联网技术智能健康监测系统的研究与设计[J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2016, 15(4): 1–7.  
HUANG Junhui, HUANG Xiaohong, YE Tingdong, et al. Research and design for the internet intelligent health monitoring system[J]. Journal of Guangdong Industry Technical College, 2016, 15(4): 1–7. (in Chinese)