doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.020

奶牛阴道植入式电阻传感器与无线监测系统研究

刘忠超[1,2]　何东健[1,3]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.南阳理工学院电子与电气工程学院,南阳 473000;
3.农业农村部农业物联网重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:针对人工监测奶牛发情费时、费力,仅依靠活动量和非接触式视频监测无法实现奶牛安静发情预警的问题,根据奶牛发情时阴道粘液生理特征变化,提出基于奶牛阴道电阻变化的奶牛发情监测方案。设计了由黄铜电阻探头、8 爪防滑装置构成的奶牛阴道植入式电阻传感器,对阴道电阻值进行采集。借助 2.4 GHz 的 ZigBee 网络开发了无线传输系统,将阴道电阻无线传送给协调器节点,协调器经由 RS485 总线传输到监控中心。开发了奶牛阴道电阻上位机实时监测系统,实现了奶牛阴道电阻的精确采集和远程实时监测。分别对植入式电阻传感器和监测系统进行了准确性、稳定性、可靠性及能量可用性试验,结果表明,植入式电阻传感器电阻测量探头体积小、安装方便,可测定 1~1 000 Ω 范围的电阻,测量精度在 ±2% 以内,24 h 内电阻最大波动为 2 Ω;在 450 m^2 奶牛养殖区范围内,ZigBee 网络数据发送成功率不低于 98.5%;植入式电阻传感器终端节点在 7.4 V/6 500 mA·h 锂电池能量供应下可连续工作38 d。监测系统运行稳定,能够精确、可靠、实时地监测奶牛阴道电阻的变化,为奶牛发情程度和排卵时间的准确预测提供了一种新的监测方法。

关键词:奶牛;发情;阴道电阻;植入式传感器;无线监测;ZigBee

中图分类号:S823.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)11-0175-11

Research of Implantable Sensor and Wireless Monitoring System for Cow's Vaginal Resistance

LIU Zhongchao[1,2]　HE Dongjian[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *School of Electronic and Electrical Engineering*, *Nanyang Institute of Technology*, *Nanyang* 473000, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The timely and accurate identification of estrus in dairy cows is an important basis for improving the success rate of artificial insemination and conception rate. Artificial estrus monitoring of dairy cows is time-consuming and laborious, and activity and non-contact video monitoring cannot achieve calm estrus early warning. To solve these problems, based on the physiological changes of vaginal mucus during estrus in dairy cows, an estrus monitoring scheme for dairy cows was proposed based on the changes of vaginal resistance. An implantable resistance sensor for dairy cow vagina was designed to collect the value of vaginal resistance, which consisted of a brass resistance probe and an 8-claw anti-skid device. The wireless transmission system was developed with the help of 2.4 GHz ZigBee network, which transmitted the vaginal resistance value to the coordinator node wirelessly, and the coordinator was transmitted to the monitoring center via RS485 bus. A real-time monitoring system for vaginal resistance of dairy cows was developed, which realized the accurate collection and remote real-time monitoring of vaginal resistance of dairy cows. The accuracy, stability, reliability and energy availability of the implantable resistance sensor and monitoring system were tested respectively. The results showed that the implanted resistance sensor was easy to install and light in weight, and could measure resistance in the range of 1~1 000 Ω. The measurement accuracy was less than ±2% and the maximum fluctuation of resistance in 24 h was 2 Ω. In a 450 m^2 dairy farming area, the success rate of ZigBee network data

收稿日期:2019-07-09　修回日期:2019-09-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701603)和国家自然科学基金面上项目(61473235)

作者简介:刘忠超(1979—),男,博士生,南阳理工学院副教授,主要从事畜牧业智能化检测与控制研究,E-mail:fly200578@sina.com

通信作者:何东健(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能检测与农业信息技术研究,E-mail:hdj168@nwsuaf.edu.cn

transmission was not less than 98.5%. The implantable sensor terminal node could work continuously for 38 d with 7.4 V/6 500 mA·h lithium battery energy supply. The monitoring system ran stably and could monitor the change of vaginal resistance of dairy cows accurately, reliably and in real time. The research can provide a new method for accurate prediction of estrus degree and ovulation time of dairy cows, and also provide reference for estrus detection of other animals.

Key words: dairy cows; oestrus; vaginal resistance; implantable sensor; wireless detection; ZigBee

0 引言

近年来,我国奶牛养殖业在国家产业政策支持下得到了快速发展,2018 年 100 头以上规模的奶牛养殖存栏量已达到 500 万头,根据国家奶牛养殖业规划,“十三五”末期 100 头以上奶牛规模化养殖将达到 70%[1]。随着规模化、集约化养殖的推进,对奶牛的饲养和管理方式提出了更高的要求,必须依靠信息技术实现奶牛的精准养殖,从而降低人工成本,提高奶牛养殖的科学管理水平和生产效率。奶牛养殖中的繁殖管理是奶牛生产的重要环节[2-3],及时有效的发情鉴定是成功进行奶牛人工授精及受孕的基础[4-5]。

传统奶牛发情监测主要依靠饲养人员观察奶牛的外部表现和精神状态,该方式不仅对饲养人员水平要求较高,而且检出效率低、费时费力,导致奶牛发情期受胎率只有 40% ~50%[6-7],无法满足规模化奶牛养殖要求。为了实现奶牛发情的自动监测,国内外诸多学者基于奶牛发情时的活动量[8-14]、体温[15-16]、声音[17-18]和爬跨行为[19-22]等特征变化,通过惯性传感器、温度传感器、声音传感器和视频监控技术实现体征参数和发情爬跨行为的自动采集、传输和分析,进而判断奶牛是否处于发情期。传感器和计算机视觉技术的应用使奶牛发情监测自动化水平显著提高,但目前基于活动量的自动化发情鉴定检出率仅为 70.23%,并且在使用中尚存在以下一些问题:①接触式传感器安装在奶牛的不同部位,对奶牛的日常行为产生影响,且部分奶牛存在“假发情”,通过活动量的发情监测不能精确判断排卵和输精时间,从而错过受孕的最佳时机。②视频监控具有非接触、实时性的特点,但是养殖场环境复杂、光照变化较大,导致视频监控技术不能有效识别群居性奶牛中的发情个体,以及无法识别没有明显发情行为特征的奶牛个体。③奶牛夜间发情占比较高,据统计,夜间(19:00—07:00)安静发情(无发情外在表现)奶牛约占全部发情奶牛的 65%[23],产后 3 个月的奶牛也容易发生安静发情,因此仅靠活动量和视频监控无法实现奶牛的安静发情预警,造成生产上的损失。④一些年老体衰的奶牛发情时,外部行为特征表现不明显,常规的外部行为鉴定法容易造成发情漏查。

奶牛内在生理体征的变化可以准确、有效地用于发情鉴定,如奶牛子宫颈和阴道粘液的 pH 值、电阻性和阴道粘膜细胞形态等[24-25]。发情奶牛阴道粘液电阻呈现规律性变化,主要为黄体期电阻最高,卵泡发育期电阻较低,在排卵前 25 h 电阻达到最低值[26]。同时,基于奶牛阴道电阻的发情鉴定具有较高的灵敏性与特异性[27]。因此,根据电阻值表征奶牛发情体征,能够确定奶牛发情最佳输精时间。文献[28]用普通万用表和 35 ~40 cm 的聚氯乙烯绝缘铝线做电极,检测发情母牛阴道 15 ~20 cm 处电阻变化,确定母牛输精时机;文献[29]利用万用表、绝缘电线和导尿管做成简易母牛发情鉴定仪,对奶牛阴道电阻进行测量,根据阴道电阻判断奶牛发情,可使奶牛受孕率达 86.3%;RORIE 等[30]采用由探针、处理器和 9 V 电池组成的 Draminski(德铭斯基)排卵测定仪,测量费时、费力;文献[31]用 Draminski 排卵测定仪手动检测阴道粘液电阻,确定杂交奶牛与小母牛的发情与授精适宜时间。

阴道分泌物粘液电阻变化与卵泡发育程度有关,是奶牛发情体征的最直接、最根本体现。奶牛发情周期中阴道内电阻变化最大的地方是阴道前庭粘膜,在接近排卵时其阴道前庭粘膜电阻降低到最小值,这是授精的最佳时间。人工测量奶牛阴道电阻时,容易引起交叉感染,且奶牛的移动性造成读数不准,同时劳动强度大、生产效率低下,无法实时监测。

本文基于奶牛发情时阴道生理粘液电阻的变化,设计小型化、高精度的奶牛阴道植入式电阻传感器,并与 2.4 GHz 的 ZigBee 网络无线连接,实现奶牛阴道电阻数据的无线实时远程传输,为奶牛发情 24 h 内自动实时监测和精确判断输精时间提供生理数据。

1 系统总体设计

1.1 设计需求

本研究以河南省南阳市育阳奶牛养殖基地为试验场所,针对目前规模化奶牛养殖场奶牛数量较多,养殖区环境复杂,通过对奶牛场实地考察和咨询养殖专家,得出奶牛阴道植入式电阻无线监测系统主要需求包括:

(1)阴道植入式电阻传感器体积小、质量轻,外壳材质柔软且无毒无害,不会对奶牛产生应激反应。

(2)植入式电阻传感器应在奶牛阴道内固定牢固,安装方便,并在授精前易于取出。

(3)植入式电阻传感器无线信号在奶牛体内传输衰减小,阴道电阻能实现无线远程传输,可实现自组网,满足规模化监测的需求。

(4)荷斯坦牛发情周期最长为 24 d,发情持续期最短仅 6 h,最长可达 36 h,因此系统需要能够在奶牛阴道内长时间工作,最少需要对奶牛阴道电阻进行一个发情周期的持续监测,以便根据奶牛阴道电阻的变化判断授精的最佳时机。

1.2　总体设计方案

根据奶牛阴道植入式电阻传感器的监测系统实际需求,系统总体结构如图 1 所示,主要由阴道植入式电阻传感器、ZigBee 终端节点、ZigBee 协调器和远程实时监控中心 4 部分组成[32]。

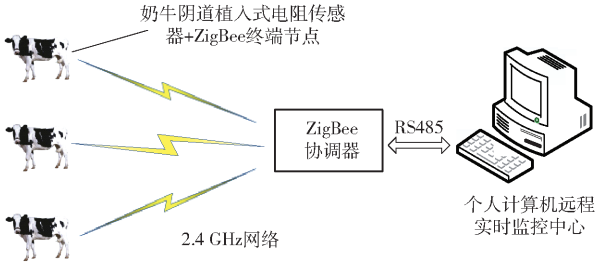


图 1　奶牛阴道电阻无线监测系统结构图

Fig. 1　Structure diagram of wireless monitoring system for cow's vaginal resistance

(1)阴道植入式电阻传感器:该传感器可植入奶牛阴道内,通过 2 个电极与阴道粘液充分接触,将阴道粘液的电阻传输给 ZigBee 终端节点处理器。

(2)ZigBee 终端节点:终端节点不仅具有 ZigBee 路由器功能,而且与植入式电阻传感器的检测电极连接,测算两电极之间的阴道粘液电阻。该设计把电阻的信号处理交给 ZigBee 终端节点处理器完成,减少了系统成本和电路复杂度。

(3)ZigBee 协调器:通过 2.4 GHz 网络与终端节点建立通信组网,负责网络构建和维护,并允许终端节点加入网络。同时通过 RS485 通信把数据远距离传送到监控中心个人计算机。

(4)远程实时监控中心:个人计算机通过上位机远程监控软件对奶牛阴道电阻进行无线实时监测并存储,同时可对相应奶牛的发情状态进行预警。

系统设计方案中,植入式电阻传感器留置于奶牛阴道内,终端节点封装后捆绑固定于奶牛尾根上部,距离奶牛阴道口较近,可以方便地与阴道植入电阻传感器相连,避免了无线信号在奶牛活体组织内传输时的衰减以及对奶牛阴道组织造成的机理损伤,同时也方便植入式电阻传感器在检测到发情状态后及时取出,顺利地对奶牛进行人工授精。ZigBee 协调器可安装于奶牛场屋顶钢结构上面,通过 RS485 总线和远程实时监控中心个人计算机进行有线通信,通信距离在奶牛场内可达 1 200 m。本设计方案不但充分利用了 ZigBee 无线自组网的功能,而且弥补了 ZigBee 通信距离短的弊端。

2　系统硬件设计

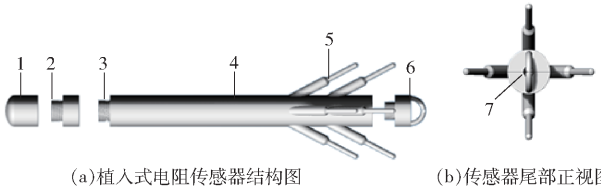
2.1　植入式电阻传感器设计

2.1.1　电阻测量方案

传统的万用表伏安法测量电阻精度低,不能实现自动测量。为了实现奶牛阴道电阻的自动实时监测,鉴于 555 测频法[33]精度高,故用该方法测量奶牛阴道电阻,能够满足对奶牛阴道电阻实时监测的需求。

2.1.2　电阻测量探头设计

植入式电阻传感器主要由电阻检测电极和支撑探杆构成,图 2 为植入式传感器的结构示意图。由于电极材料对测量结果的稳定性和准确性至关重要,因此植入式电阻传感器的电极选用导电和导热性能好、材质便宜、易于加工的黄铜。同时电阻传感器前端设计两个圆环形凹槽,电极设计为圆环状并分别装在两个圆环形凹槽内,能够保证植入奶牛阴道的电阻传感器电极与阴道穹隆部位小池粘液的充分接触,使其对宫颈口的阴道粘液没有阻挡作用,保证测量结果的准确性和可靠性,且不会对奶牛阴道粘膜造成损伤。每个圆形凹槽侧面设计一个直径为 3 mm 孔洞,将两个铜环电极引线通过孔洞由探杆内部连接至 ZigBee 终端节点处理器,避免铜环电极引线裸露在传感器探杆外部对奶牛阴道组织造成损伤。



(a)植入式电阻传感器结构图　　(b)传感器尾部正视图

图 2　奶牛阴道植入式电阻传感器结构图

Fig. 2　Structure charts of cow's vaginal implantable resistance sensor

1. 凸形圆滑前端　2. 圆环形凹槽　3. 凹槽侧面孔洞　4. 探杆　5. 防滑凸指　6. 尾部拉环　7. 尾部内嵌式孔洞

2.1.3　电阻传感器尺寸及封装设计

根据植入式电阻传感器设计方案和装配两个铜环电极的需要,传感器前端采用分段式结构,以便于

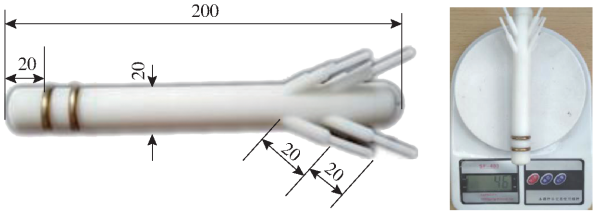
固定安装铜环电极。为了避免植入式传感器对奶牛阴道粘膜的损伤并便于放入奶牛阴道,传感器顶端采用凸形圆滑结构。

具有生育功能的成年奶牛阴道长度为 220 ~ 280 mm,宽约 55 mm,奶牛阴道前庭粘膜电阻在一个发情周期内变化最大,因此该位置是测量阴道电阻的最佳位置。为了保证传感器植入奶牛阴道后牢固,防止在奶牛运动时脱落,根据奶牛阴道深处穹隆较大的特点,植入式电阻传感器尾部设计采用 4 × 2 的防滑落 8 爪式固定。每个防滑落凸指向外倾斜 30°,长度为 35 mm,且凸指分为 2 节,使其在穹腔处形成一个双层的固定卡位[34]。

如图 2a 所示,在传感器末端设计直径为 20 mm 的半圆形拉环,便于植入式电阻传感器放入奶牛阴道并于授精前取出。

为了将铜环电极通过导线引出到终端节点处理器从而进行电阻的测量计算,探杆内部设计了两个通道用于引出电极导线,并在末端设计了直径为 2 mm 的内嵌式孔洞,如图 2b 所示。

由于植入式电阻传感器要放置于奶牛阴道内,传感器封装材质的选择非常重要,从奶牛健康和保护其阴道组织的角度考虑,选择无毒、无味、比较柔软的高密度聚乙烯材料(High density polyethylene, HDPE)来封装传感器。传感器外壳 3D 打印而成,直径为 20 mm,长度为 200 mm,封装后的阴道植入式电阻传感器如图 3 所示,质量为 46 g,不及 Draminski 发情电阻检测仪质量(300 g)的 1/6。柔软的高密度聚乙烯材料封装避免了文献[28 - 29]中人工使用探针电极和导线对奶牛阴道组织造成损伤的问题。



(a) 尺寸 (b) 质量

图 3 封装后的植入式电阻传感器

Fig. 3 Assembled implantable resistance sensor

2.1.4 电阻传感器的植入及应激分析

植入式电阻传感器需要放置于奶牛阴道内,使探头与阴道前庭穹隆部位粘液进行接触。根据文献[35 - 36]以及调研、咨询奶牛养殖专家,植入式电阻传感器放入奶牛阴道前需要将表面擦净,并用酒精擦拭消毒,待干燥后植入。放置时,奶牛要站姿固定于牛舍内,将尾巴拉于一侧,清洗外阴并用酒精进行擦拭消毒,轻轻分开奶牛外阴,将消过毒的植入式电阻传感器的探棒缓缓地沿阴道背壁插入宫颈口处的阴道前庭,并轻轻移动使其与穹隆部的阴道粘液充分接触。电阻传感器植入奶牛阴道后的位置见图 4。

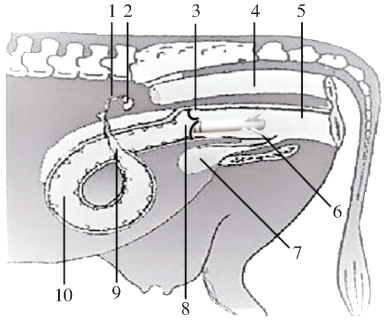


图 4 电阻传感器植入奶牛阴道示意图

Fig. 4 Schematic of resistance sensor implanted in cow's vagina

1. 输卵管 2. 卵巢 3. 阴道前庭穹隆 4. 奶牛直肠 5. 阴道 6. 植入式电阻传感器 7. 膀胱 8. 子宫颈 9. 子宫角 10. 子宫体

文献[35 - 36]采用合成塑料棒探杆和铂黑电极测试奶牛阴道粘液,其连续 50 d 的测量未见明显阴道刺激和任何异常分泌物,也未见其他不良反应。本文设计的传感器采用 HDPE 封装,HDPE 是生物惰性材料,与生物组织的相容性极佳,对生物组织和细胞无毒性反应,无排斥[37 - 38],已成为人造器官的重要材料,主要用于制作人工气管、人工骨、矫形外科修补材料等。因此,采用 HDPE 材质封装的传感器植入奶牛阴道后,不会对奶牛健康带来不良影响,也不会引起奶牛阴道刺激、损伤、分泌物异常等应激反应。

2.2 ZigBee 终端节点设计

终端节点设计主要包括系统电源电路、ZigBee 最小系统(CC2530 微处理器)以及 NE555 方波输出电路等模块,其硬件结构如图 5 所示。图 5 中阴道植入式传感器输出的电阻信号变化引起 NE555 振荡电路频率的变化,通过 CC2530 微处理器测量 NE555 振荡电路频率可以得到奶牛阴道粘液电阻。

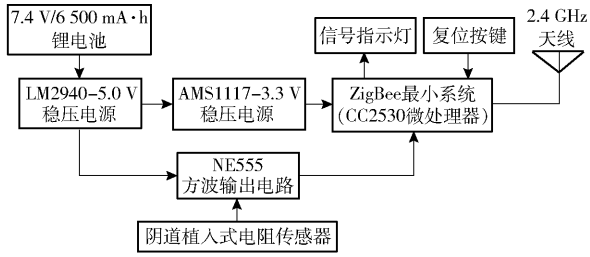


图 5 终端节点电路硬件结构示意图

Fig. 5 Terminal node circuit structure diagram

2.2.1 电源电路设计

根据系统需求分析,为了实现终端节点对奶牛阴道电阻数据的实时采集和处理,以及对奶牛阴道

电阻进行至少一个发情周期的监测，系统选用体积小、供电稳定、持续时间长的 7.4 V/6 500 mA·h 可充电锂电池为终端节点供电。同时系统采用低压差稳压芯片 LM2940 将 7.4 V 电源电压降为 5 V，为工作电压为 5 V 的 NE555 电路供电。采用 AMS1117－3.3V 稳压芯片将 5 V 电压降为 3.3 V，为工作电压为 3.3 V 的 CC2530 微处理器供电。

2.2.2　NE555 方波发生电路

由 NE555 芯片和 R1、R2、C1 组成如图 6 所示的多谐方波振荡输出电路，电路输出脉冲频率由 R1、R2、C1 确定。

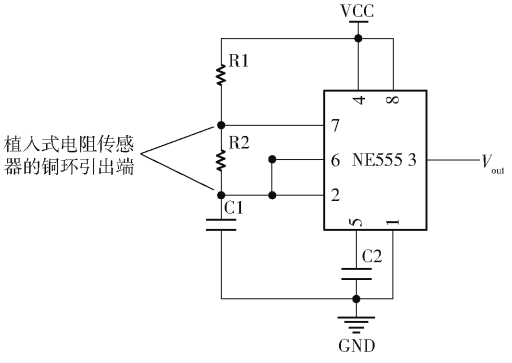


图 6　NE555 方波发生电路图

Fig. 6　Circuit diagram of square wave generation for resistance measurement

由图 6 电路可知，电路输出的脉冲频率为

$$f=\frac{1}{\ln 2C_1(R_1+2R_2)} \tag{1}$$

式中　f——电路输出脉冲频率，Hz

R_1——与电路输出脉冲频率相关的电阻，Ω

R_2——待测奶牛阴道电阻，Ω

C_1——振荡电路充放电电容，μF

由式(1)可知，可以通过测量输出脉冲频率来计算被测电阻 R_2，即

$$R_2=\frac{1}{2\ln 2C_1 f}-\frac{R_1}{2} \tag{2}$$

根据奶牛阴道电阻从间情期到发情期在 150 ~ 600 Ω 之间变化，设计 R_2 测量量程为 1 ~ 1 000 Ω。考虑 CC2530 微控制器可接受的脉冲频率为 0 ~ 20 kHz，以及电阻功耗不能太大，选择 R_1 为 500 Ω（精密电阻），C_1 为 1 μF（独石电容）。

2.2.3　终端节点控制器

终端节点主要完成奶牛阴道电阻数据的采集、处理和发送。采用 TI 公司的 CC2530F256 主控芯片，该芯片是一个具有 2.4 GHz 频率和 IEEE 802.15.4 标准 ZigBee 功能的片上系统，内置增强型 8051CPU，只需少量外围器件即可组成性能强大的 ZigBee 节点。为了降低终端节点系统的功耗，采用电源休眠技术，工作时唤醒，以满足终端节点低功耗要求。

2.3　无线传输网络设计

考虑到规模化养殖场奶牛数量较多，需要建立自组网络实现群体奶牛阴道电阻值的无线传输。目前较为成熟的无线技术均工作在免费 ISM 频段，如蓝牙、WiFi 和 ZigBee 等。蓝牙通信距离较短，WiFi 通信协议复杂、成本较高，而 ZigBee 专用芯片的成本和自身功耗都较低、算法简单，且具有较高的可靠性和安全性。故选择基于 IEEE 802.15.4 标准的 ZigBee 组网。

奶牛阴道电阻无线监测网络采用星型拓扑结构，由多个终端节点和一个协调器节点组成。终端节点接收阴道植入式传感器的电阻信号，实现电阻由奶牛体内到体外的测量传输，每个终端节点通过无线网络向协调器传输数据。

协调器节点负责整个系统无线网络的建立及管理，采用 CC2530 微控制器，具有由休眠模式转换到主动模式的超短时间的特性，能够满足植入式传感器低功耗的要求。由于 ZigBee 无线传输距离有限，为了降低系统的丢包率，将协调器布置在奶牛养殖活动区的中心，有利于数据的稳定传输。

为了实现协调器节点信号到上位机监控中心的远距离传输，将 ZigBee 协调器串口发送出的 TTL 信号转换为负逻辑电平的 485 信号，通过 RS485 现场总线远距离传输到个人计算机实时监控中心，其数据传输速率可高达 100 Kb/s，且传输稳定可靠。

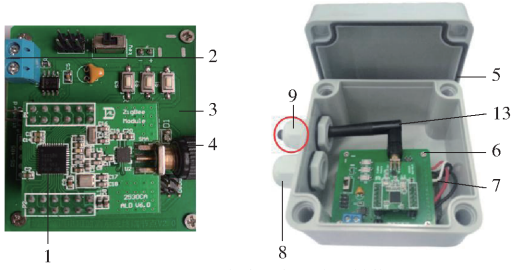
2.4　终端节点和协调器的封装

终端节点和协调器网关节点在硬件电路上基本相同，只是协调器上不需要植入传感器信号处理电路。采用将 ZigBee 处理器和系统功能分成上、下两层板设计，电路板上留有液晶屏接口和系统状态指示灯，便于调试和维护。同时对 PCB 电路板进行合理布局，并采用贴片元器件和集成电路使其电路板达到 4 cm × 4 cm × 2 cm 的较小体积。

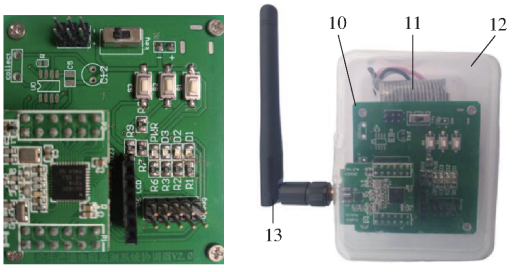
协调器节点固定于牛舍内，对防水和封装无太多要求，采用 6 cm × 5 cm × 4 cm、透明的 ABS 材质的防水盒进行封装。固定裸露于奶牛尾根部的终端节点，采用防水盒来实现防水。防水盒质量 90 g 左右，韧性好，防撞、防水、防潮。盒子侧面开口安装有可与植入式传感器连接的防水接线端子和天线裸露端子。

图 7 为终端节点与协调器的电路板及封装实物图，电池及相应的电路处理部分分别固定封装在盒子中。为了避免防水盒对天线信号传输造成衰减，终端节点通信天线露置于壳体外部，以实现数据的

无线准确传输,如图 7a 中红色圆圈所示。防水盒的接线端子和天线露出位置均采用防水尼龙接口进行处理。



(a) ZigBee终端节点电路和封装



(b) ZigBee协调器电路和封装

图 7 ZigBee 终端节点和协调器实物图

Fig. 7 Photos of ZigBee terminal node and coordinator

1. ZigBee 处理器模块 2. 传感器连接端 3. 系统功能底板 4. 天线连接端子 5. ABS 防水封装盒子 6. 终端处理器模块 7. 电池模块 8. 植入式传感器接线防水接口 9. 裸露天线防水接口 10. 协调器模块 11. 电池模块 12. ABS 塑料封装盒 13. 天线

2.5 终端节点奶牛尾部固定及应激分析

2.5.1 奶牛尾部的固定方法

现有牛只用传感器主要通过项圈佩戴悬挂于脖颈、捆绑于腿部或固定于奶牛尾部。终端节点悬挂于脖颈会影响奶牛进食、饮水等活动,由文献[39 - 43]可知,奶牛尾部固定传感器已有实际应用,如用于奶牛体温测定、奶牛分娩时尾部翘起和移动的重力监测等。终端节点安装固定于奶牛尾根部可以使节点尽量避开牛只之间的碰撞,且距离植入式传感器较近,便于信号的传输。故本文采用将终端节点固定在奶牛尾根部的方案。根据文献[41 - 43]以及奶牛的尾部结构形状,设计奶牛尾夹固定器,如图 8 所示,主要由双环形紧固扎带孔、螺钉过孔、防水盒固定支架座组成。

防水盒固定支架座可采用高密度聚乙烯板或环氧玻璃纤维板,尺寸为 6 cm × 6 cm × 1 cm,无毒易加工、韧性较好,具有 4 个螺钉过孔以便与图 7a 防水封装盒连接。通过调整两端扎带将防水盒固定于牛尾部。

2.5.2 奶牛尾部应激分析

奶牛尾部的功能主要是驱赶蚊虫、苍蝇以及挠痒。将封装后质量仅为 210 g 的终端节点固定于奶牛尾根上部,不会影响奶牛尾巴甩动,也不会影响奶牛尾巴驱赶蚊蝇等功能,应激反应小。

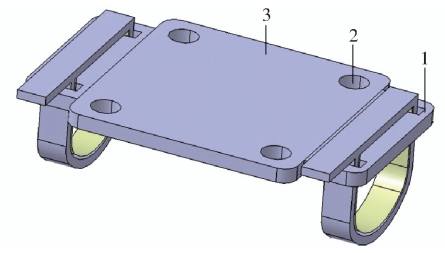


图 8 奶牛尾夹示意图

Fig. 8 Schematic of cowtail clip

1. 双环形紧固扎带 2. 螺钉过孔 3. 防水盒固定支架座

3 系统软件设计

奶牛阴道电阻无线监测系统软件采用模块化设计,主要包括电阻采集与处理模块、无线信号传输模块以及奶牛阴道电阻上位机实时监测系统 3 部分。

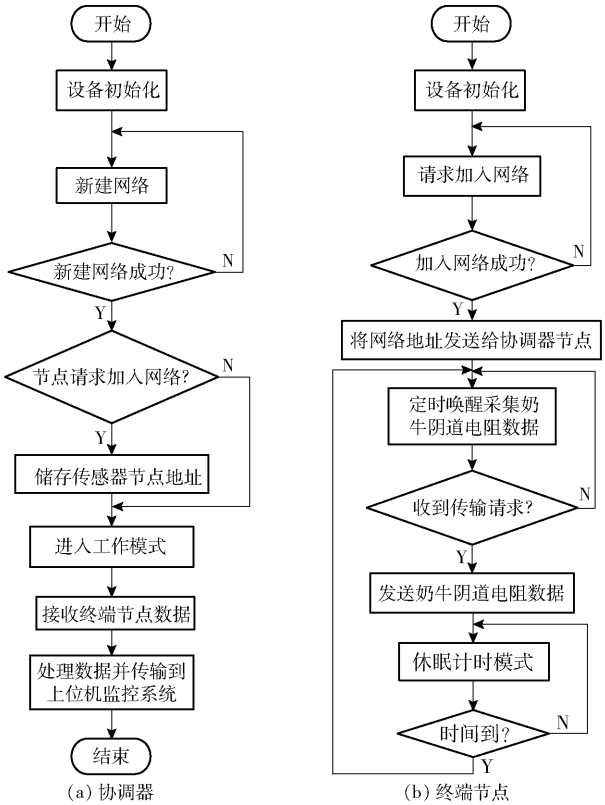
3.1 系统工作流程

奶牛阴道电阻至少需要一个发情周期的连续监测,为了减少整个系统的功耗,根据奶牛的发情特征(发情状态持续 1 ~ 2 d),系统采用定时唤醒的工作机制,每 2 h 进行一次数据采集和传输。系统通电后进行终端节点和协调器的初始化,完成系统组网。终端节点处理奶牛阴道内传感器采集的电阻,通过组建好的星型网络,将不同奶牛佩戴的终端节点所采集的阴道电阻发送至协调器,协调器将数据处理后,通过 RS485 总线上传到远程个人计算机后,上位机远程监控软件对数据解码处理后将电阻实时显示并记录保存。系统主程序流程图如图 9 所示。

3.2 上位机监控界面设计

Visual Basic(VB)软件具有功能强大、控件丰富、能够与外部设备实现串口通信等特点,因此选用 Microsoft VB 6.0 软件开发奶牛阴道电阻上位机监测系统,监测系统主要包括:系统登陆、监测系统主界面、电阻实时变化曲线、电阻历史曲线、奶牛发情状态显示等。

每头奶牛所佩戴的终端节点配置不同的数据帧头,因此上位机接收到无线传感网络发送来的数据不同,需要在后台对接收的数据进行解码,实现对不同奶牛阴道电阻与发情状态监测。图 10 所示为奶牛阴道电阻实时监测主界面,该界面主要分为 4 部分:参数设置、奶牛阴道电阻信息区、奶牛发情状态显示区以及奶牛阴道电阻实时变化曲线。参数设置功能用于选择个人计算机可用串口,设置串口的通信属性,以及根据实际情况设置发情期电阻阈值和阴道电阻采样时间间隔。串口通信参数设置完成后,选择奶牛对应的编号,系统即响应和显示所选奶



(a) 协调器　　(b) 终端节点

图 9　系统主程序流程图

Fig. 9　Flow charts of system main program

牛的电阻,并根据设置的发情期电阻阈值判断奶牛是否处于发情期。电阻实时显示曲线可显示所监测奶牛 24 h 内阴道电阻变化,方便进行实时监测和发情期预测。系统还具有奶牛阴道电阻数据保存、历史电阻曲线查看等功能。

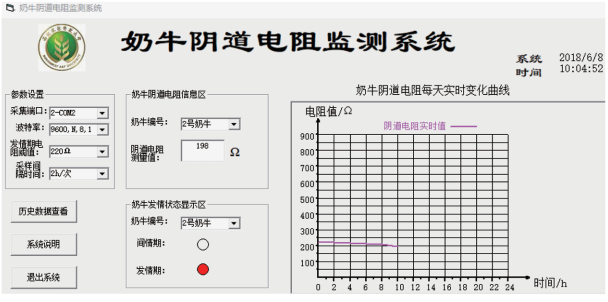


图 10　奶牛阴道电阻实时监测主界面

Fig. 10　Real-time monitoring interface of cow's vaginal resistance

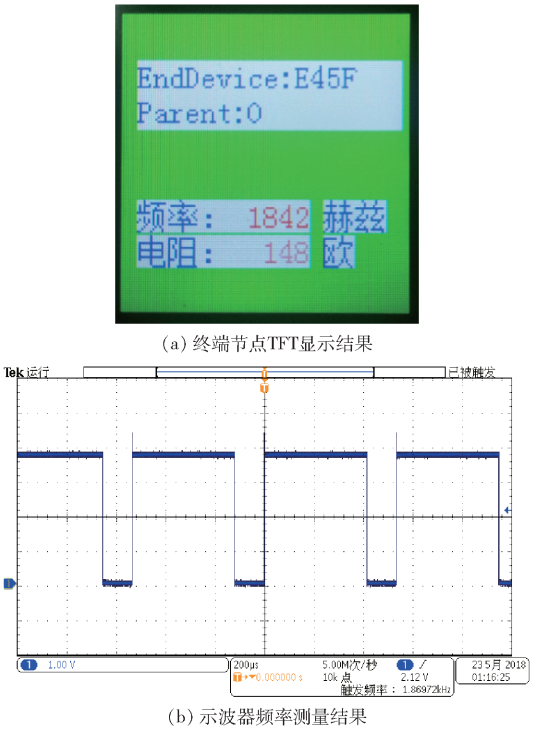
3.3　发情预警系统设计

奶牛在一个发情周期中根据其生理变化分为发情期和间情期,发情期电阻最低,间情期电阻最高。根据文献[27 -31]研究结果,奶牛阴道前庭电阻在 180 ~220 Ω 时处于发情期,且为最佳受孕时间;在间情期时电阻较大,可达 300 ~600 Ω。同时越接近发情排卵期,其阴道电阻呈迅速下降趋势,排卵期过后电阻又逐渐升高并恢复至间情期水平,且在奶牛阴道电阻降至最低时为奶牛的最佳授精时间。在上位机监测系统监测到奶牛阴道电阻后,通过与发情期电阻阈值进行判别并给出奶牛的发情状态。上位机发情预警系统设计的奶牛发情期阴道电阻阈值为 220 Ω,还可以根据奶牛阴道电阻的变化曲线来判断奶牛的发情状态。

4　试验与结果分析

4.1　电阻测量系统准确性试验

为了验证电阻测量系统的准确性,考虑到奶牛阴道电阻在 150 ~600 Ω 之间,选用 1 kΩ 高精度可调电位器(上海天逸电器有限公司,精度 ±0.25%,电位器、刻度盘和旋钮一体化)测试系统的准确性。试验时,为了直观显示终端节点振荡电路频率和测量电阻,在终端节点上安装 3.2 寸薄膜晶体管(Thin film transistor,TFT)来实现人机交互。为了验证测量结果的准确性,利用 Tektronix MDO3052 型示波器(泰克公司,美国)进行 555 振荡电路频率信号的测量,ZigBee 终端节点将采集的频率和电阻显示在 TFT 屏上。当测试的精密电位器阻值为 150 Ω 时,终端节点 TFT 和示波器显示结果如图 11 所示。



(a) 终端节点TFT显示结果

(b) 示波器频率测量结果

图 11　植入式电阻传感器准确性测试结果

Fig. 11　Implanted resistance sensor accuracy test results

为了使测试电阻与奶牛实际阴道电阻范围相一致,调整电位器的阻值在 100 ~800 Ω 范围内,用普通万用表和植入式电阻无线监测系统进行测试比较,结果如表 1 所示。

根据精密标准电阻的测试结果,分别对植入式电阻传感器和普通万用表测试结果进行线性回归分

表 1 电阻测量准确性对比

Tab. 1 Accuracy comparison of resistance test Ω

测试序号	可调电位器电阻	普通万用表测量电阻	植入式电阻传感器测量电阻
1	100	103	101
2	150	150	148
3	200	203	202
4	250	252	251
5	300	298	298
6	350	352	352
7	400	403	401
8	500	498	499
9	650	653	651
10	800	804	798

析,其拟合关系分别为

$$Y_0 = 0.998\,1x + 0.813\,7 \tag{3}$$

$$Y_1 = 1.002\,1x + 0.837\,0 \tag{4}$$

式中 x——可调电位器真实值,Ω

Y_0——植入式电阻传感器测量值,Ω

Y_1——普通万用表测量值,Ω

由式(3)、(4)可知,测量值与真实值的决定系数 R^2 分别为 0.992 0 和 0.999 9。表明植入式电阻传感器的测量结果可以真实地表征奶牛的阴道电阻。从表 1 可以看出,植入式电阻传感器系统测量精度稳定在 ±2%,解决了文献[28 - 29]中用万用表和导线探针测量奶牛阴道电阻精度不高、费时费力的问题。

4.2 电阻测量稳定性试验

为了验证植入式电阻传感器测量系统的稳定性,室温条件下在 2 个聚丙烯槽里放置 3 L 的 NaCl 溶液,通过添加 NaCl 来调整浓度,用高精度数字万用表(FLUKE 15B)测量其电阻分别为 180、220 Ω。奶牛阴道电阻在 180 ~ 220 Ω 时最适宜授精,选取这两个阻值可以真实地模拟奶牛阴道电阻变化。试验时选取 2 个植入式电阻传感器投入两个聚丙烯槽内,稳定性试验如图 12 所示。

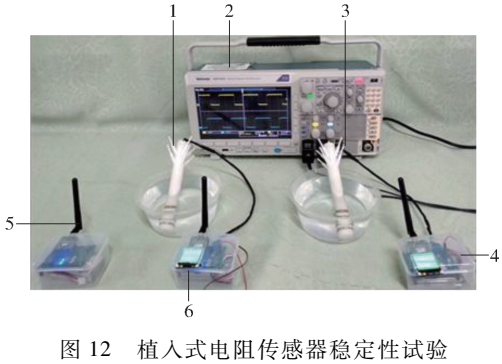


图 12 植入式电阻传感器稳定性试验

Fig. 12 Stability test of implantable resistance sensor

1. 植入式电阻传感器 1 2. 示波器 3. 植入式电阻传感器 2 4. 终端节点 1 5. 协调器节点 6. 终端节点 2

根据奶牛发情特点以及阴道电阻的变化状态,连续测量观察 24 h,每隔 2 h 通过终端节点液晶屏读取所测电阻,2 个传感器在标准电阻为 180 Ω 和 220 Ω 时测得结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,在设定的 2 个电阻下传感器测量的电阻稳定性较好,连续 24 h 内电阻变化不大,最大波动为 2 Ω,未发生明显的阻值波动异常现象,传感器具有较好的稳定性,能够较好地测量奶牛阴道的实时电阻,避免了文献[28 - 30]人工操作接触不良导致测量不稳定的问题。

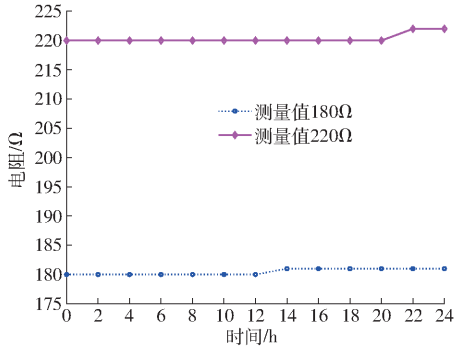


图 13 稳定性测试结果

Fig. 13 Stability test result

4.3 系统可靠性试验

4.3.1 系统网络传输结构

系统的网络传输结构采用 ZigBee 无线网络技术与 RS485 工业总线相结合,可以实现两者的优势互补。根据实际调研情况,奶牛阴道电阻采集频率不用太高,一般 2 h 或更长时间采集 1 次,系统的数据量比较小。为了进一步避免网络堵塞,系统采用简单的停止等待应答协议,协调器每次发送 1 帧数据后,停止发送,等待上位机确认应答。在协调器收到确认反馈帧后则继续发送下一帧数据,如果在规定的时间内没有收到确认反馈帧,则重发上一帧数据,从而保证了数据在协调器和上位机之间传输不丢包。

系统通过采用 RS485 “主从式”通信模式和简单的数据传输停止等待协议双重措施,使得 485 通信线路中不会出现网络堵塞和数据的丢包,保证了数据的正确及时传输。整个系统的数据丢包主要发生在终端节点和协调器之间的无线通信上。

4.3.2 系统丢包率测试

奶牛养殖区环境复杂,其传输距离、养殖场建筑物遮挡等因素均会导致无线信号传输的衰减,导致数据在终端节点和协调器之间发生丢包现象,影响系统的可靠性。为了测试系统的通信传输距离对数据丢包率的影响,选择河南省南阳市育阳奶牛养殖基地的奶牛活动区进行测试,活动区面积为 30 m ×

15 m，设置植入式传感器终端节点发射功率为 1 dBm 的，信道频率为 2.4 GHz，工作电压为 3.3 V。测试场地和协调器节点安装位置如图 14 所示，将协调器节点（图中黄色区域）固定于距离水平地面高度为 3 m 的养殖场钢棚横梁上。



图 14　丢包率测试场地

Fig. 14　Packet loss rate test site

在奶牛活动区人工移动植入式传感器终端节点，并逐渐增加收发距离，使其与协调器节点通信距离分别为 5、10、20、40、80、100 m，测试点对点丢包率。测试时同一位置每次发送 1 000 个数据包，采用 TI 公司的 SmartRF Studio7 软件进行测试，测试结果如表 2 所示。

表 2　系统通信距离与丢包率测试结果

Tab. 2　Test results of system communication distance and packet loss rate test results

测试序号	通信距离/m	发送数据包数/个	接收数据包数/个	丢包率/%
1	5	1 000	1 000	0
2	10	1 000	998	0.2
3	20	1 000	997	0.3
4	40	1 000	994	0.6
5	80	1 000	990	1.0
6	100	1 000	985	1.5

由表 2 可知，由于奶牛养殖场环境复杂，随着测试距离的增大，数据丢包率增大，接收灵敏度不断变小。在测试距离为 20 m 时，网络几乎没有丢包现象，数据包在 100 m 范围内，丢包率不高于 1.5%，能够实现自组网和奶牛阴道电阻的无线远程传输。

4.4　终端节点能量可用性试验

植入式电阻传感器的终端节点采用电池供电，当电池电量低于一定阈值时，终端节点将不能正常工作。为了验证终端节点的连续工作性，选用 7.4 V/6 500 mA·h 可充电锂电池，采用定时唤醒的工作机制，测试时设置终端节点为每 2 h 进行一次采样，每次连续采样 5 个电阻值，且每个电阻值采集间隔 1 min。对采集到的 5 个电阻采用均值滤波处理，作为当前采样时刻的电阻值，该方法有利于终端节点以最小能耗传输数据。

在连续测量的第 38 天时，终端节点电池电压降为 6 V，不能满足 CC2530 控制器 3.3 V 正常工作电压的需要。因此可以在一个发情周期内对奶牛阴道电阻进行连续监测，当监测到电阻降低到 220 Ω 以下时，表明奶牛处于发情期，可取出植入式传感器给终端节点充电，并对奶牛进行输精操作。植入式电阻传感器仅在奶牛 1 个发情周期内留置于阴道内，时间较短，可最大程度减小奶牛的应激反应。

5　结论

（1）根据奶牛发情时阴道粘液电阻变化，设计了一种基于阴道电阻变化的奶牛发情监测系统。系统能够准确有效地监测奶牛阴道电阻的变化，可实现 24 h 奶牛发情全覆盖监测，对奶牛的安静发情也能较好地进行监测。

（2）设计了一种由铜环电极、8 爪防滑装置构成的奶牛阴道植入式电阻传感器，完成了终端节点的防水封装，设计了一种固定终端节点的新型奶牛尾夹，实现了基于 ZigBee 网络的奶牛阴道电阻远程无线实时监测。

（3）试验结果表明，奶牛阴道植入式电阻传感器体积小，质量仅为 46 g，测量精度为 ±2%，连续 24 h 内电阻测量值最大波动为 2 Ω，稳定性好，响应速度快，上位机可实时监测奶牛阴道电阻。终端节点在 7.4 V/6 500 mA·h 锂电池供电下，可连续工作 38 d，能够实现一个发情周期内对奶牛阴道电阻的连续检测。

（4）设计的网络传输结构合理，穿透性强，系统可靠性高，数据发送成功率不低于 98.5%，能够方便地实现自组网，为奶牛发情程度和排卵时间的准确预测提供了一种新的方法。

参　考　文　献

[1]　王玉庭. 浅谈发展本土奶源的重要性[J]. 中国乳业，2017(3):6－8.
WANG Yuting. Discussion on the importance of developing local milk source[J]. China Dairy, 2017(3):6－8. (in Chinese)

[2]　肖建华，胡玉龙，范福祥，等. 奶牛繁殖决策支持系统的构建[J]. 中国农业科学，2012，45(10):2012－2021.
XIAO Jianhua, HU Yulong, FAN Fuxiang, et al. Contruction of a decision support system for dairy cattle breeding [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10):2012－2021. (in Chinese)

[3]　邱建飞. 奶牛发情监测系统的设计[D]. 保定：河北农业大学，2012.

QIU Jianfei. Design of automatic system to detect cow oestrus[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012. (in Chinese)

[4] 寇红祥,赵福平,任康,等.奶牛体温与活动量检测及变化规律研究进展[J].畜牧兽医学报,2016,47(7):1306-1315.
KOU Hongxiang, ZHAO Fuping, REN Kang, et al. The progress on detection method and the regularities of body temperature and activities in dairy cows[J]. Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2016,47(7):1306-1315. (in Chinese)

[5] 何东健,刘冬,赵凯旋.精准畜牧业中动物信息智能感知与行为检测研究进展[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):231-244.
HE Dongjian, LIU Dong, ZHAO Kaixuan. Review of perceiving animal information and behavior in precision livestock farming [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 231-244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160532&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.032. (in Chinese)

[6] ATTARAS E E, SPAHR S L. Detection and characterization of estrus in dairy cattle with an electronic heatmount detector and an electronic activity tag[J]. Journal of Dairy Science, 2001, 84(4): 792-798.

[7] 田宏志,刘江静,陈晓丽,等.奶牛生殖激素和体温的性周期变化及调控机制研究进展[J].中国畜牧杂志,2019,55(2):27-32.
TIAN Hongzhi, LIU Jiangjing, CHEN Xiaoli, et al. Research progress on sexual cycle changes and regulatory mechanisms of reproduction hormone and body temperature in dairy cows[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019,55(2):27-32. (in Chinese)

[8] 曹学浩,黄善琦,马树刚,等.活动量监测技术的研究及其在奶牛繁殖管理中的应用[J].中国奶牛,2013(8):37-40.
CAO Xuehao, HUANG Shanqi, MA Shugang, et al. Applications of activity monitoring technology in dairy cattle breeding management[J]. China Dairy Cattle, 2013(8):37-40. (in Chinese)

[9] JIANG X, DENG S Y, LIU W, et al. Identification effects of pedometer on estrus of holstein cows during peak lactation period [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2014,6(2):63-65.

[10] SCHOFIELD S A, PHILLIPS C J C, OWENS A R. Variation in milk production, activity rate and electrical impedance of cervical mucus over the oestrus period of dairy cows[J]. Animal Reproduction Science, 1991,24(3): 231-248.

[11] 郑伟,年景华,李军.奶牛计步器的应用效果分析[J].中国奶牛,2014(22):32-34.
ZHENG Wei, NIAN Jinghua, LI Jun. Analysis on the application effect of cow pedometer[J]. China Dairy Cattle, 2014 (22):32-34. (in Chinese)

[12] 甘芳,杨健琼,张克春,等.牧场管理专家系统在有机牧场的应用及导电性与奶成分相关性的分析研究[J].上海畜牧兽医通讯, 2010(2):5-8.
GAN Fang, YANG Jianqiong, ZHANG Kechun, et al. Application of pasture management expert system in organic pasture and analysis of correlation between electrical conductivity and milk composition[J]. Shanghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2010(2):5-8. (in Chinese)

[13] 李跃华,岳云峰,范吉云.低功耗奶牛行为监测仪的设计[J].苏州大学学报(工科版),2010,30(2):27-30.
LI Yuehua, YUE Yunfeng, FAN Jiyun. Design of low power cow behavior monitor[J]. Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition), 2010,30(2):27-30. (in Chinese)

[14] 柳平增,丁为民,汪小昂,等.奶牛发情期自动检测系统的设计[J].测控技术, 2006, 25(11):48-51.
LIU Pingzeng, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. Design of automatic system to dectect cow oestrus[J]. Measurement & Control Technology, 2006,25(11):48-51. (in Chinese)

[15] TALUKDER S, KERRISK K L, INGENHOFF L, et al. Infrared technology for estrus detection and as a predictor of time of ovulation in dairy cows in a pasture-based system[J]. Theriogenology, 2014,81(7):925-935.

[16] SUTHAR V S, BURFEIND O, PATEL J S, et al. Body temperature around induced estrus in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2011,94(5):2368-2373.

[17] YAJUVENDRA S, LATHWAL S S, RAJPUT N, et al. Effective and accurate discrimination of individual dairy cattle through acoustic sensing[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2013,146(1):11-18.

[18] CHUNG Y, LEE J, OH S, et al. Automatic detection of cow's oestrus in audio surveillance system[J]. Asian-australasian Journal of Animal Sciences, 2013,26(7):1030-1037.

[19] DEL FRESNO M, MACCHI A, MARTI Z, et al. Application of color image segmentation to estrusc detection[J]. Journal of Visualization, 2006,9(2):171-178.

[20] TSAI D, HUANG C. A motion and image analysis method for automatic detection of estrus and mating behavior in cattle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,104:25-31.

[21] 顾静秋,王志海,高荣华,等.基于融合图像与运动量的奶牛行为识别方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):145-151.
GU Jingqiu, WANG Zhihai, GAO Ronghua, et al. Recognition method of cow behavior based on combination of image and activities[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 145-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170619&journal_id= jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.019. (in Chinese)

[22] 张子儒.基于视频分析的奶牛发情信息检测方法研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

ZHANG Ziru. Research on detection of cow estrus information based on video analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[23] 姜红. 三种奶牛发情鉴定方法的比较[J]. 中国畜牧杂志, 2002(5): 37 - 38.
JIANG Hong. Comparison of three estrus identification methods for dairy cows[D]. Chinese Journal of Animal Science, 2002(5): 37 - 38. (in Chinese)

[24] 吴瑞辉. 奶牛体征参数处理系统设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
WU Ruihui. The design of a system for processing the signs and parameters of dairy cow[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010. (in Chinese)

[25] MORAIS R, VALENTE A, ALMEIDA J C, et al. Concept study of an implantable microsystem for electrical resistance and temperature measurements in dairy cows, suitable for estrus detection[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 132(1): 354 - 361.

[26] ANDERSSON L M, OKADA H, MIITRA R, et al. Wearable wireless estrus detection sensor for cows[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 101 - 108.

[27] 寇红祥, 李蓝祁, 王振玲, 等. 牛发情期活动量与阴道黏液电阻值变化规律的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2017, 48(7): 1221 - 1228.
KOU Hongxiang, LI Lanqi, WANG Zhenling, et al. Study on the regulations of activity and vaginal electrical resistance of cattle during the estrous cycle[J]. Acta Veterinaria Et Zootechnica Sinica, 2017, 48(7): 1221 - 1228. (in Chinese)

[28] 牛海昌, 曹灿民, 南朝俊. 用电阻测定母牛最适受精时间提高受孕率的试验报告[J]. 中国牛业科学, 1995(4): 8.
NIU Haichang, CAO Canmin, NAN Chaojun. Test report on improving fertility rate of cows by determining the optimum fertilization time with resistance[J]. China Cattle Science, 1995(4): 8. (in Chinese)

[29] 吴元昌, 郑羽, 高建新. 发情鉴定仪测定母牛适宜配种时机[J]. 畜牧兽医杂志, 2008, 27(2): 92 - 93.
WU Yuanchang, ZHENG Yu, GAO Jianxin. Estrus appraisal instrument for determining suitable breeding timing of cows[J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2008, 27(2): 92 - 93. (in Chinese)

[30] RORIE R W, BILBY T R, LESTER T D. Application of electronic estrus detection technologies to reproductive management of cattle[J]. Theriogenology, 2002, 57(1): 137 - 148.

[31] NINGWAL D, NEMA S P, KUMAR S, et al. Vaginal electrical impedance of cervico-vaginal mucus in relation to fertility in crossbred cows and heifers[J]. Indian Journal of Veterinary Sciences & Biotechnology, 2018, 13(4): 92 - 94.

[32] 何东健, 刘畅, 熊虹婷. 奶牛体温植入式传感器与实时监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 195 - 202.
HE Dongjian, LIU Chang, XIONG Hongting. Design and experiment of implantable sensor and real-time detection system for temperature monitoring of cow[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 195 - 202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181225&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.025. (in Chinese)

[33] 邹华东, 谢发忠, 陈小林. 基于 555 多谐振荡电路的自动电阻测量仪[J]. 长春大学学报, 2013, 23(6): 669 - 672.
ZOU Huadong, XIE Fazhong, CHEN Xiaolin. Automatic resistance measurement instrument based on 555 oscillation circuit[J]. Journal of Changchun University, 2013, 23(6): 669 - 672. (in Chinese)

[34] LEE C N, GEBREMEDHIN K G, PARKHURST A, et al. Placement of temperature probe in bovine vagina for continuous measurement of core-body temperature[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(9): 1201 - 1205.

[35] 殷国荣, 杨建一, 卫泽珍, 等. 电极探测法进行发情鉴定对母牛宫颈—阴道粘液微生物区系的影响[J]. 黑龙江动物繁殖, 2000(3): 6 - 8.
YIN Guorong, YANG Jianyi, WEI Zezhen, et al. Effect of electrode detection on cervical-vaginal mucous microflora in cows[J]. Heilongjiang Journal of Animal Reproduction, 2000(3): 6 - 8. (in Chinese)

[36] MCCAUGHEY W J. Pregnancy diagnosis in cattle by measuring vaginal electrical resistance[J]. Veterinary Research Communications, 1981, 5(1): 85 - 90.

[37] 刘戈, 王黔, 杨庆华, 等. 聚氨酯弹性体和 Medpor 作为人工耳支架材料的力学研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2019, 33(4): 492 - 496.
LIU Ge, WANG Qian, YANG Qinghua, et al. Mechanical study of polyurethane elastomer and Medpor as the material of artificial auricular scaffold[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2019, 33(4): 492 - 496. (in Chinese)

[38] 蒋顶军, 周小梅. 医用塑料技术应用新进展[J]. 国外塑料, 2013, 31(6): 36 - 40.
JIANG Dingjun, ZHOU Xiaomei. The new progress of the application of medical plastic technology[J]. World Plastics, 2013, 31(6): 36 - 40. (in Chinese)

[39] 马姗. 一种奶牛用体温发情检测装置: 201420812833.3[P]. 2015 - 07 - 01.

[40] 刘晓江. 奶牛发情爬跨监测纸: 201120459723.X[P]. 2012 - 08 - 01.

[41] 刘福成. 一种奶牛尾卡: 201721923555.9[P]. 2019 - 02 - 05.

[42] 刘存来. 一种奶牛尾卡: 201520940878.3[P]. 2016 - 04 - 13.

[43] 汪家玲. 挂钩型奶牛尾卡装置: 201520324320.2[P]. 2016 - 01 - 20.