doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.001

畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析

张小栓[1,2]　张梦杰[1]　王　磊[1]　罗海玲[3]　李　军[4]

(1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室，北京 100083；
3. 中国农业大学动物科学技术学院，北京 100193；4. 中国农业大学经济管理学院，北京 100083)

摘要：目前畜牧养殖环节信息监测技术依然落后，且普及率不高，无法准确、有效地掌握养殖环节农场动物本身及其生活环境的实际状况。本文在整理和总结现有穿戴式技术研究成果基础上，结合我国畜牧养殖实际情况和特点，对畜牧养殖穿戴式信息监测的工作原理、信息监测技术和穿戴式监测方式等方面进行了分析和讨论。总结得出未来研究趋势：信息获取方式由人工采集向自动化采集发展；穿戴式传感器将向微型化和柔性化方向发展；信号处理与信息传输将向多元化、复合化和智能化方向发展；信息监测方式将向系统性、整体性和自适应方向发展。

关键词：畜牧养殖；信息监测；穿戴式技术；智能化

中图分类号：S818　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)11-0001-14

Research Status and Development Analysis of Wearable Information Monitoring Technology in Animal Husbandry

ZHANG Xiaoshuan[1,2]　ZHANG Mengjie[1]　WANG Lei[1]　LUO Hailing[3]　LI Jun[4]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Laboratory of Food Quality and Safety*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Animal Science and Technology*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*
4. *College of Economics and Management*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: As the basic link of livestock product supply, animal husbandry is of great significance to ensure the quality of animal products and the healthy development of industrial economic benefits. At present, the information monitoring technology in animal husbandry is still lagging behind, and the penetration rate is not high. It is impossible to accurately and effectively grasp the actual conditions of the farm animals themselves and their living environment. On the basis of sorting out and summarizing the existing research results of wearable technology, combining with the actual situation and characteristics of animal husbandry in China, the working principle, information monitoring technology and wearable monitoring methods of wearable information monitoring in animal husbandry were mainly analyzed and discussed. The research trends were summarized as follows: the development of information acquisition from manual acquisition to automatic acquisition; wearable sensors would be miniaturized and flexible; signal processing and information transmission would develop towards diversification, compounding and intellectualization; the way of information monitoring would be systematic, holistic and adaptive; and the application of wearable information monitoring technology would improve the level of aquaculture management and decision-making.

Key words: livestock farming; information monitoring; wearable technology; intellectualization

0　引言

作为畜牧业大国，我国逐渐由家庭散养向规模养殖模式发展，传统的畜牧业在养殖、运输和销售等环节存在着大量的不足和问题[1-2]。随着信息技术的快速发展，利用现代信息技术解决传统畜牧业的不足和问题，探索畜牧业现代信息化发展方式，激发畜牧业内在增长动力，对推动和实现畜牧业稳定可

收稿日期：2019-07-19　修回日期：2019-09-27

基金项目：国家现代肉羊产业技术体系项目(CARS-38)和政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0111200)

作者简介：张小栓(1978—)，男，教授，博士生导师，主要从事无线传感器网络及应用研究，E-mail：zhxshuan@cau.edu.cn

通信作者：李军(1976—)，男，教授，博士生导师，主要从事肉羊产业经济研究，E-mail：sirlijun@126.com

持续发展具有重要意义。

近年来,穿戴式技术的快速发展受到广泛关注,穿戴式设备被应用在运动追踪、健身、生物医疗等诸多领域。穿戴式信息监测技术融合多媒体、传感器和无线通信等技术于一体,有望成为对动物健康监管最有效和可行的技术[3-4]。本文对穿戴式信息监测技术的相关研究进行系统文献整理和综述,以期为穿戴式信息监测技术在畜牧业领域更加广泛而深入的应用提供理论支持。

1 畜牧养殖穿戴式信息监测工作原理

穿戴式畜牧养殖信息监测系统主要由信息采集单元、信息处理单元、无线传输单元和智能终端等组成[5-6],信息采集单元采集养殖环境信息(光照强度、温湿度、气体浓度等)、动物的生理信息(体温、血压、心率、呼吸等)和行为信息(静止、跳跃、跑动、打斗、声音信息等),信息处理单元对信息采集单元采集的各种信息进行降噪滤波等预处理,然后对信息进行分析处理、传输和存储,信息处理单元处理过的信息通过无线传输单元传输到智能终端进行显示和存储,对农场动物的健康状况等信息进行实时动态监测和管理。如图 1 所示为畜牧养殖穿戴式信息监测工作原理图。

为适应监测对象、穿戴部位和监测参数等要求,穿戴式设备往往被特别定制,其穿戴形式包括束缚式、贴覆式和植入式。考虑到体积、成本和能耗等因素,束缚式穿戴设备常被应用在牛、羊、猪等大中型家畜身上,贴覆式和植入式设备常被应用在鸡、鸭、鹅等小型家禽身上。对于散养或放牧养殖方式,主要实现定位和追踪功能,对于圈养养殖方式,主要监测其生理信息与生活环境信息。

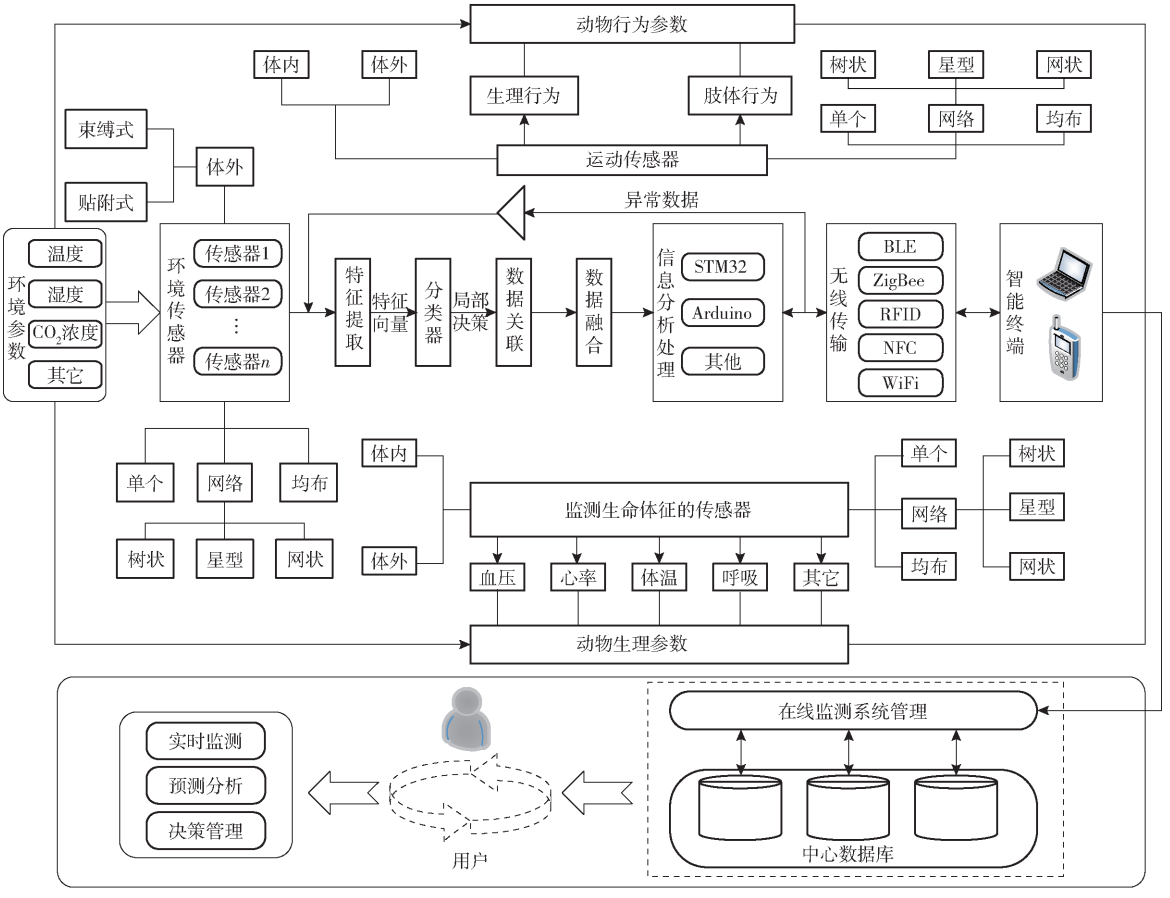


图 1 畜牧养殖穿戴式信息监测工作原理图

Fig. 1 Schematic of animal husbandry wearable information monitoring

2 畜牧养殖穿戴式信息监测技术

2.1 信息感知技术

2.1.1 穿戴式传感器技术

传感器是实现信息收集、传输、存储等功能的基础元器件,用于畜牧养殖穿戴式传感器主要分为运动传感器、生命体征传感器以及环境传感器等类型,图 2 所示为畜牧养殖穿戴式信息监测参数示意图。传感器通常用于感知监测对象的信息变化,该技术作为穿戴式信息监测技术的核心技术之一,对穿戴式技术的发展具有十分重要的作用。

运动传感器:运动传感器主要用于监测被测对

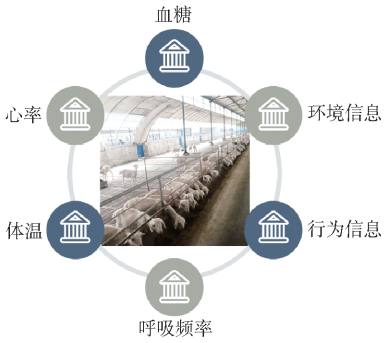


图 2　畜牧养殖穿戴式信息监测参数示意图

Fig. 2　Schematic of monitoring parameters of wearable information in animal husbandry

象的运动状态，可测量与运动相关的位移、速度、加速度等物理量。养殖场内动物的自由活动可能会引起动物个体、动物与动物之间、动物与环境的相互作用，从而对动物造成损伤、应激，甚至影响养殖场经济效益及可持续发展[3-4]，因此有必要开发相应设备监测养殖场自由活动的动物。在生物医学领域，MOON 等[7] 应用一种惯性压电式传感器 BioStampRC 进行多发性硬化症的步态特征监测，此传感器结构简单灵敏度高，但体积较大不易集成；CHUNG 等[8] 开发的穿戴式压阻式弯曲运动传感器，体积小、续航能力强，具有同时检测弯曲曲率和速度的功能；DEGRAFF 等[9] 使用碳纳米管打印出柔性压力传感器，该传感器相比于传统的压力传感器灵敏度提升 70%，且具有极高的线性度，可更加精准地对动物行为进行监测。而及时发现动物发情行为是提高农场动物繁殖能力的重要手段[10]；任亮等[11] 研究了计步器监测系统与人工监测效率，结果显示计步器监测系统能够得到更准确的发情检出率；PONS 等[12] 提出了一种基于深度追踪的动物体位和身体部位自动检测系统，并对基于监督和监测的几种分类算法的性能进行了详尽的评估。为了评估活羊应激水平，CUI 等[13] 设计了基于 Arduino 开源平台的三轴加速度计用于测量和记录活羊运动及其行为状态（图 3），研究表明，活羊应激反应与其行为表现具有一定的相关性。在动物计算机交互领域，人们越来越关注自动检测动物的行为和身体姿势，这将给动物福利带来好处，实现远程通信、福利评估、行为模式检测、交互和适应系统等。因此，使用传感器模块或传感器集成平台监测动物生理行为具有十分重要的意义。

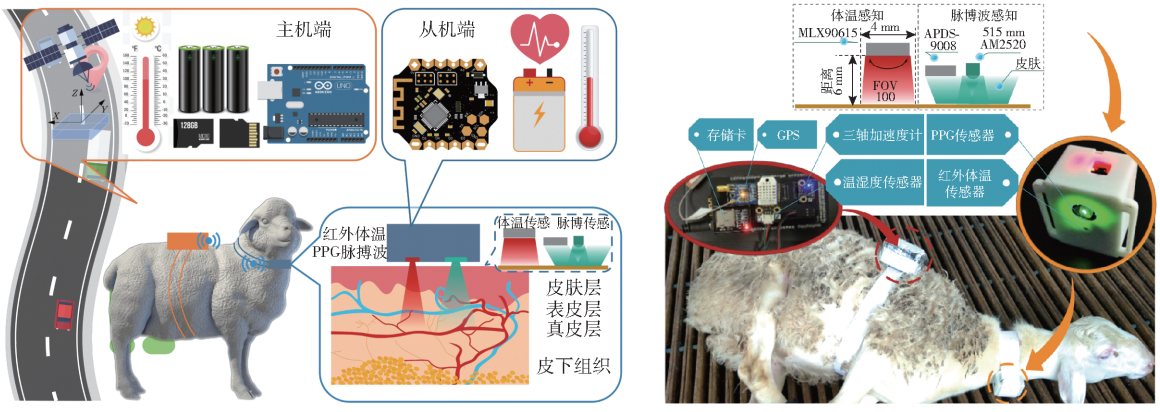


图 3　基于 Arduino 开源平台的活羊应激水平监测示意图

Fig. 3　Schematic of stress level monitoring of live sheep based on Arduino open source platform

生命体征传感器：研究表明，生命体征变化可反映人或动物的病情轻重和危急程度[14-15]，即监测人或动物的体温、心率、血压、呼吸、脑电波等生命体征，对保证人或动物健康具有重要意义。用于监测生命体征的传感器的实现方式主要是电极式、放射式和透射式，目前脑电波监测的形式几乎全部为电极式。胡良文等[16] 利用 4X1DS18B20 电极式温度传感器阵列采集温度数据，对比试验验证了该系统连续测量的可靠性，测量精度为 0.06℃，虽然测量精度较高，功耗低，但传感器阵列不易集成，体积大、操作繁琐；柏广宇等[17] 研制出母猪体温监测节点，选择母猪臀部为最佳测量部位，选用 MLX90614 型红外温度传感器为温度测量传感器，实现实时远程监测母猪体温，操作方便，系统测量误差为 0.21℃，满足养殖行业对猪体温测量误差的要求。此外，基本生命体征指标可以反映和评估活羊应激水平，CUI 等[13] 设计了基于 Arduino 开源平台的生命体征监测装置（图 3），该装置包括主机端和从机端，主机与从机通过蓝牙模块实现通信，其测量指标包括体表温度、心率等，结果表明，在应激状态下活羊体温和心率指标均处于不适宜状态。

环境传感器：环境传感器能够监测畜牧养殖环境状态的实时变化[18-19]，包括温湿度传感器、气体浓度传感器、雨量传感器、光照传感器、风速风向传感器等，不仅能够精确地测量相关环境信息，还可以和上位机实现联网，满足用户对被测物数据的测试、

记录和存储。WEEKLY 等[20]描述了一种 BiB 传感器用于收集丰富的建筑物的环境参数(如 CO_2 浓度等);KIM 等[21]研制出一种基于 3×3 矩阵离子通道的柔性温度传感器,并证明它能够在特定区域内对温度进行高度选择性、灵敏和灵活的测量;通过改变采集节点的传感器类型,能够实现对不同场合的监测任务,陈镱等[22]设计了一种新型环境监测系统,基于无线传感器网络对 CO_2 浓度、温湿度等环境参数进行监测。表 1 所示为穿戴式信息监测传感器性能比较。

表 1 穿戴式信息监测传感器性能比较

Tab. 1 Performance comparison of wearable information monitoring sensors

传感器类别	类型或型号	实现方式	监测参数	特点	文献序号
运动传感器	加速度传感器	压电式	步态特征	结构简单,灵敏度和信噪比高,存在电荷泄漏	[10]
	加速度传感器	压阻式	弯曲曲率和速度	体积小,低功耗,集成容易,频率响应好,结构复杂	[11]
生命体征传感器	NJL5501R	反射式/透射式	血氧饱和度	发射光线,能耗高,易受外来光源、	[23]
	红外温度传感器	反射式/透射式	体温	体毛的影响,操作简单,便于远程监控	[24]
	光纤 pH 传感器	反射式/透射式	pH 值		[25]
	压电薄膜传感器	电极式	心率	功耗低,干扰小,需要双手检测数据,	[26]
	干电极	电极式	脑电波	不容易集成	[27]
	4X1DS18B20	电极式	体温		[16]
环境传感器	DHT11	电阻式	温湿度	结构复杂,体积小,能耗低	[28]
	气体传感器	电阻式	CO_2 浓度		[29]

2.1.2 特征参数识别

畜牧养殖穿戴式信息监测特征参数识别分为生理特征参数识别[30]、行为特征参数识别[31-32]和环境特征参数识别[33-34],其中生理特征参数识别和行为特征参数识别是技术难点,因为监测对象较为活跃,对传感器的稳定性、精度和布置方式等要求较高。表 2 综合分析了常见的穿戴式信息监测生理参数及传感器类型。

表 2 常见穿戴式信息监测生理参数及传感器类型

Tab. 2 Physiological parameters and sensor types of common wearable information monitoring

监测参数	传感器名称或类型	量程范围	分辨率	精度	文献序号
血压	压电薄膜传感器	0~0.04 MPa	1.33×10^{-4} MPa	±5.0%	[35]
	光电脉搏传感器		1.33×10^{-4} MPa	1.0%	[36]
体温	DS18B20	-55~125℃	0.1℃	±0.5℃	[37]
	热敏电阻型	-10~300℃	0.1℃	±0.1℃	[38]
	红外体温传感器	-20~85℃	0.1℃	±0.5℃	[17]
心率	ADS1292R			±0.1%	[39]
	PPG 传感器	30~250 次/min	1 次/min	±1.0%	[40]
	压电薄膜传感器		1 次/min		[41]
呼吸	HKH-11B	0.2~1.0V	0.1V		[42]
	PPG 传感器		1 次/min		[43]
	JY901 加速度传感器	-16~16 g	0.1 g		[44]
脑电波	干电极	1~100 μV	0.1 μV	±0.2%	[45]
pH 值	钨丝针式 pH 传感器	-2.00~15.00	0.01	±0.01	[46]
	pH 复合电极	0~14.00		±0.3%	[47]

生理特征参数识别:生理特征参数直接关联动物的健康水平,应用于生理特征参数识别的传感器主要有电极式、反射式和透射式,并且向多传感集成的方向发展。参数识别方法主要是运用各类监测生理参数的传感器,获取畜牧养殖过程中农场动物的心率、体温、呼吸等参数数据,并运用均值聚类算法、主成分分析法、神经网络算法、遗传算法和特征元素法等方法提取特征参数信息,建立生理特征与机体健康程度之间的关系模型。

行为特征参数识别:本文研究的动物行为特征主要表现在动物咀嚼、俯仰、行走、跳跃、爬跨、咳嗽等方面,运用穿戴式运动传感器可记录农场动物的日常行为特征,便于研究分析农场动物在养殖环节产生的特定规律性变化,为生产者决策管理提供理

论依据。动物运动行为的声学分析已被证明能够准确地识别咀嚼和咬伤，根据钳口运动的原理可有效区分动物的咬合和拒绝行为，RUTTER[48]研制一种由鼻带、ART－MSR 压力传感器和计算机接口组成的穿戴式行为记录仪；CLAPHAM 等[49]提出了一种声学记录和分析系统，利用靠近动物嘴的宽频传声器获取数学信号，用来自动检测、分类和评估放牧肉牛的摄食情况；宣传忠等[50]提出一种改进的 MFCC 与 HMM 相互结合的羊咳嗽声识别系统，该系统识别率高，能够达到对羊咳嗽声的识别要求。声音监测在农场动物的监测中具有十分重要的作用，通过这种监测指标能够比较清楚了解动物的生理状态，对控制动物进食量、降低动物疾病传染风险等方面具有一定的贡献。

此外，通过布置传感器网络节点可对动物行为进行较为全面的监测，WATANABE 等[51]使用三轴加速度传感器对牛下颚部位运动特征进行监测，分析牛咬断草食、咀嚼草食、休息等行为；NADIMI 等[52]提出使用无线传感器网络节点对牛颈部的俯仰角及运动速度进行监测，使用分类树对牛的行为进行分类并预测牛群其他个体的行为；尹令等[53]设计了一种奶牛行为特征监测系统，在奶牛的颈部装配无线传感器节点并使用 K-均值聚类算法对参数进行分类识别，可以细致区分奶牛静止、慢走、爬跨等行为。

2.2　信号分析与处理

穿戴式信息监测技术能进一步分析挖掘更加有价值的信息，促进畜牧养殖业更好发展。应用于畜牧养殖信息监测的各类传感器采集的信号大部分是微弱信号，信号不仅强度较弱，而且信号噪声高、衰减快，不能获得精准的信号，从而对动物的健康状况水平不能进行精准的判断。如图 4 与表 3 所示，信号分析与处理方法主要研究内容有时域分析、频域分析、时频分析以及数字滤波等方法[54－55]。

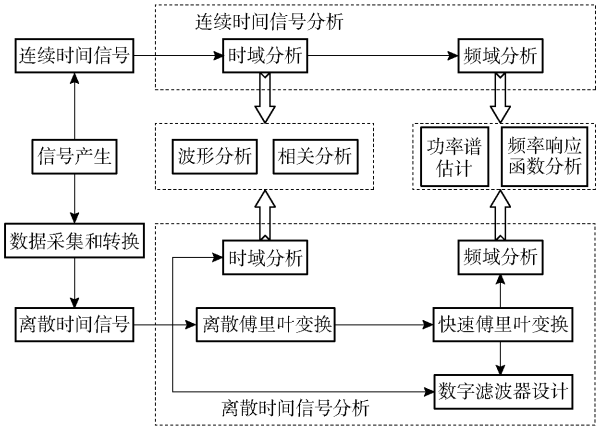


图 4　信号分析与处理原理图

Fig. 4　Signal analysis and processing schematic

表 3　信号分析与处理方法对比

Tab. 3　Comparison of signal analysis and processing methods

方法	分类	原理	基本公式	适用范围
时域分析法		在时域内对信号进行滤波、放大、相关性分析等处理	$x(t)\approx\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n\Delta\tau)\frac{u(t-n\Delta\tau)-u(t-n\Delta\tau-\Delta\tau)}{\Delta\tau}\Delta t$	稳定、线性信号
频域分析法		按照正弦交流电路计算方法对不同频率的正弦量进行求解	$\int_{-\pi}^{\pi}X(e^{jw})e^{jwn}dw=\int_{-\pi}^{\pi}\sum_{-\infty}^{\infty}(x(n)e^{-jwn})e^{jwn}dw$	稳定、线性信号
时频分析法	短时傅里叶变换	利用时频分布来分析信号，能给出各时刻瞬时频率及其幅值，并且能够进行时频滤波和时变信号研究	$X(s)=\int_{0-}^{\infty}x(t)e^{-st}dt, X(s)=L[x(t)]$	平稳或近似平稳信号
	小波变换		$WT(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt\quad(a>0)$	非平稳信号
	Hilbert－Huang 变换		$H(w,t)=Re\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\,e^{j\int w_i(t)dt}$	非平稳非线性信号
数字滤波法		将输入序列通过一定运算变换成输出序列	$Y(e^{j\omega})=X(e^{j\omega})G(e^{j\omega})$	线性信号

2.2.1　时域分析法

时域分析法根据时间历程记录信号波形，研究动物生理信号的幅值等参数、信号的稳态和交变分量随时间变化的情况，分析传感器采集的原始波形，保留信号最完整的信息，但生理信号处理的时间范围较小、精密度较低[54]。如 CUI 等[13]通过研究心脏结构以及心脏跳动规律，并选择 5 个典型时域参数分析了活羊心率变异性，结果表明，活羊心率变异性时域特征可反映活羊应激水平。

2.2.2　频域分析法

在生理信号的提取过程中会混入大量的噪声，在对信号进行频域处理之前要对信号进行滤波处理，提高信噪比，其理论基础是傅里叶变换[54]。相较于时域分析法，频域分析法的精密度较高一些，沈劲鹏等[56]首先对原始信号进行 FFT 分析，以确定呼吸信号和心跳信号的频带范围，然后将原始信号分

解为若干 IMF 分量,重构呼吸信号和心跳信号。该方法得到的呼吸率和心率的准确性都超过 90%,可以很好地提取呼吸和心跳信号;SHARMA 等[57]提出了一种基于广态滤波的方法对呼吸信号进行处理,实验表明基于广义同态滤波的离散傅立叶变换 EDR 技术优于基于离散傅立叶变换的同态滤波。

2.2.3 时频分析法

生理信号的时域分析和频率分析都是从整体上对动物生理信号进行处理,无法反映信号的局部特征且只能处理平稳的、线性的生理信号,时频分析法可以反映信号时间和频域之间的关系[58]。HASSANPOUR[59]提出了一种利用时频分布降低信号时间序列噪声的方法,信号的时频首先被划分为信号子空间和噪声子空间,使用时频矩阵的奇异值作为空间划分的标准,增强了信号时频表示嵌入的信息。

2.2.3.1 小波变换

小波变换(Wavelet transform,WT)继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想,同时克服了窗口大小不随频率变化等缺点,能够提供一个随频率改变的“时间-频率”窗口,是进行信号时频分析和处理的理想工具。刘思佳等[60]基于小波分解与去噪原理,通过串联多次小波变换实现对睡眠时呼吸信号的去噪与提取;王芳等[61]在心电信号处理过程中,为了避免产生 Gibbs 振荡现象和严重的频率混叠现象,提出基于双树复小波变换,并结合最大后验估计确定阈值的心电信号去噪方法,与传统离散小波变换相比,双树复小波变换去噪更彻底,边界、纹理等特征能较好地保留,可以作为一种生物医学信号降噪处理的新方法;AKAR 等[62]使用小波包变换对心电信号进行处理,实验证明可以较好降低心电信号中的噪声,解决了小波变换只对低频信号进行处理的局限,分解更加细化。

2.2.3.2 Hilbert - Huang 变换

Hilbert - Huang 变换是一种新兴的时频分析方法,能有效处理非线性非平稳信号问题,但存在操作时间过长、结果精准度不高等问题[63]。针对脉率变异性提取方法,丑永新等[64]提出一种基于 Hilbert - Huang 变换的脉率变异性信号(PRV)提取方法,即对脉搏信号进行经验模态分解,得到脉搏信号的内禀模态函数及其边际谱,根据边际谱的频率范围选取能反映脉率变化的内禀模态函数分量,从分量中提取 PRV 信号。将所提出的方法应用于实际采集的脉搏信号,能从脉搏信号中准确地提取 PRV 信号,并且抗噪性很强。

2.2.4 数字滤波方法

实验采集的动物生理信号存在大量的噪声,时域分析法、频域分析法、时频分析法在消除和减少信号噪声时存在局限和制约。数字滤波的原理是输入信号中有用成分和希望除去的噪声部分各自占有不同的频带,把输入序列通过一定运算变换成输出序列[65]。段力等[66]提出了一种基于数字滤波的呼吸信号去噪方法,仿真实验表明该方法能够有效去除呼吸信号中的高频噪声干扰和抑制基线漂移,为临床上实现便携式呼吸监测打下基础;张志鹏[67]使用基于 LMS 算法的自适应滤波器消除了与有用信号频域重叠的运动伪迹干扰噪声,提高了运动状态下血氧饱和度检测数据的精确度;ACHARYA 等[68]使用研制的自适应 Savitzky - Golay 滤波器在不同信噪比下对噪声合成脑电波图信号进行了测试,自适应 SG 滤波器去除了噪声,保持了信号的原始形状,该方法计算简单,速度快,效率高。此外,该方法还可用于其他信号,如心电图、肌电图、脑电波图。

2.2.5 综合分析方法

信号分析与处理通常结合多种方法以实现更加全面的功能,如赵素文等[69]先对 PPG 信号进行 9 层小波分解得到具有较高信噪比呼吸波,并用改进的 FFT 频率估计法从该信号中提取呼吸率,仅用光电传感器便能同时完成呼吸率、心率及血氧饱和度等多项指标的监测。针对心电信号处理中噪声难以消除问题,殷俊鹏等[70]提出一种基于小波域数字滤波的基线漂移去噪算法,采用提升小波分解心电信号,对最高层尺度系数做数字高通滤波处理,并重构得到去除基线漂移信号,在计算复杂度和性能方面能取得比传统算法更好的平衡;郭洪量等[71]利用小波分析进行预处理,再利用简单整系数滤波器进行进一步消噪,改进的心电信号消噪方法性能优于传统的小波阈值去噪法和数字滤波法,处理时间比小波阈值去噪法低 33%;GERMAN-SALLO 等[72]利用连续的小波变换和频谱分析结合的方法对心电信号进行处理,降低信号的噪声效果显著。此外,神经网络等智能算法也得到了广泛应用,MICHIELLI 等[73]提出了一种基于长短期记忆块(LSTM)的级联递归神经网络(RNN)结构,处理脑电波信号,对睡眠阶段精准分类;GHADERYAN 等[74]提出了一种新的简单而有识别性的算法,该算法采用了最小生理信号数目和时变奇异值分解(TSVD)方法,与以往的傅立叶变换、倒谱变换、小波变换和传统的方法相比,该方法具有更好的性能。

2.3 信息传输技术

穿戴式设备通过信息传输技术实现网络互联,

信息传输技术实现对传感器采集的关键信息进行快速有效存储、分析和处理，图 5 所示为畜牧养殖穿戴式信息传输网络示意图。为实现奶牛体温信息的实时远程监测，武彦等[75]以 CC2430 芯片为核心开发了测温节点、路由节点和协调器节点，基于 ARM9 的微处理器 S3C2440A 和嵌入式 Linux 构建了网关节点，采用 ZigBee 技术实现无线网络自组网和监测数据自动汇聚，并用 LabVIEW 设计了数据存储、体温监测预警及系统运行状态监视的上位机软件，该系统为奶牛疾病及分娩期预测提供了有效工具；李丽华等[76]以 ATmega 16 单片机为核心进行数据采集传输，使用 C#语言编写人机交互界面，实现了蛋鸡体温变化的实时采集、存储、显示以及历史数据查询，该装置体温测量误差为 0.1%；王世平等[77]采用 CC2530 芯片作为主控芯片处理传感器采集的数据，上位机软件使用 VC#编写，总体处理比较稳定；李年攸等[78]采用 Arduino mega 2560 单片机处理采集的养殖环境数据，可实现大型养殖场环境（温度、湿度、光照）的自动监控，在降低养殖户专业知识门槛的同时，节约财力物力的投入，提高了养殖的经济效益。

作为穿戴式设备，要体现携带方便、穿脱方便、操作灵活、安全性高以及低功耗等特点，无线通信设备具有至关重要的作用。无线通信技术能够实现穿戴式设备与智能设备的相互关联，吴振宇等[79]提出一种基于蓝牙 4.0BLE 协议栈和 GSM 移动通信网络的新型无线心率穿戴式设备，具有体积小、功耗

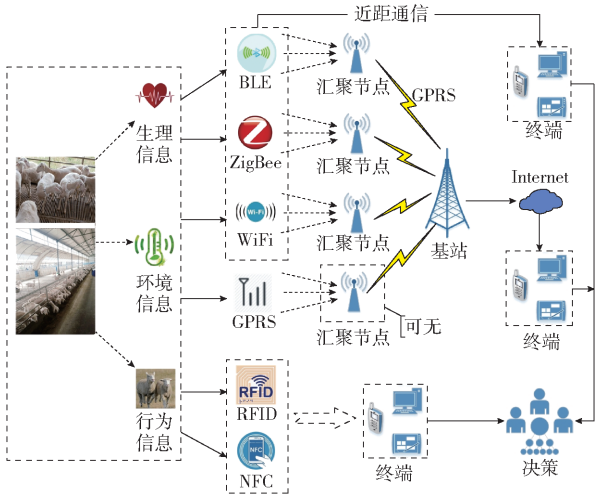


图 5　畜牧养殖穿戴式信息传输网络示意图

Fig. 5　Schematic of wearable information transmission network for livestock breeding

低、结构简单、穿戴方便、测量准确、实时性好和成本低等优点；刘忠超等[80]将处理的养殖环境信息使用 ZigBee 无线传输给智能终端，实现了对牛舍环境的远程无线实时监测，但传输不稳定，容易受外界环境的影响；于晓婷等[81]设计了一种畜牧业免疫管理系统，运用 NFC 技术对畜牧免疫信息进行存储，用户可以通过手机软件或网页进行畜牧信息的管理；MA[82]使用主动 RFID 进行种猪的个体识别和生命指标的采集，指标包括了呼吸、脉搏、血压、体温，实现无源更低功耗采集生理数据，操作更加方便，信息更加安全，但不能实现连续动态监测，其更多应用于追溯方面。表 4 所示为各种无线通信技术的比较与分析。

表 4　通信方式比较与分析

Tab. 4　Comparison and analysis of communication methods

通信方式	传输距离	传输速度	优点	缺点	适用场景
蓝牙	较近	较快	功耗低，成本低，同时管理数据和声音传输，延时低	设备间协议不兼容，需要本地数据记录，确保数据不间断可用	短距离数据交换
ZigBee	较远	慢	低复杂度，低成本，低功耗，自组网，高安全性	传输速率低，容易受到外界影响	远程监测与控制
RFID	近	较慢	易于操控，使用寿命长，应用范围广	安全性不够强，技术标准不统一	近距数据交换
NFC	近	较慢	带宽高，能耗低，安全系数高，便捷性好	兼容性差，政策问题	近距数据交换
WiFi	较近	快	速度快；一对多，可多人连线	成本高，需要单独网卡，需要路由器或 AP 设备，自组性差	短距离数据交换
GPRS/3G/4G	远	快	速度快，距离远，实时通信	能耗高，技术标准不统一	远程监测与控制

2.4　人机交互技术

人机交互技术是实现人与穿戴式信息监测设备之间语音交互[83]、姿态交互[84]、眼动交互[85]等方式的互动技术（如图 6 所示）。人机交互技术的发展为消费者带来了更好的用户体验，同时也是穿戴式技术实现解放双手的重要技术之一。基于视觉的手势识别率低，实时性差，需要研究各种算法来改善识别的精度和速度，眼睛虹膜、掌纹、步态、语音、人脸、DNA 等人类特征的研发应用也正受到关注，多通道的整合也是人机交互的热点，另外，与“无所不在的计算”、“云计算”等相关技术的融合与促进也需要继续探索。

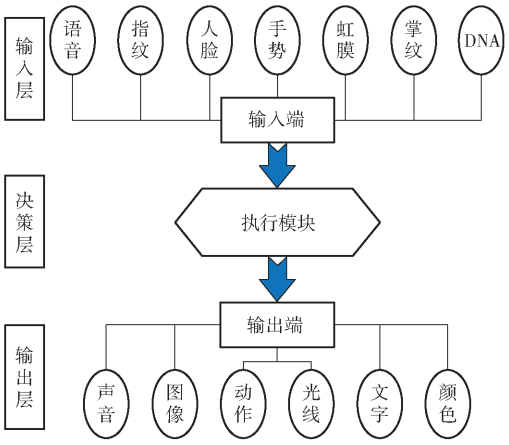


图 6 人机交互技术示意图

Fig. 6 Schematic of human-computer interaction technology

目前,相关研究已经取得一定进步,如 ZHANG 等[86]根据人体生物电信号的特点,设计了皮层信号采集与调节电路,利用特征提取算法识别人体行为特征,然后利用物联网建立无线局域网,该系统的建设为物联网环境下的无线控制和康复娱乐的应用和扩展提供了一个有效可行的方案;MALASSIOTIS 等[87]使用深度摄像头对空间人体部位识别与跟踪,利用深度与手部几何特征,进行手势与姿态识别;盛卫华等[88]采用一个惯性传感器来采集被试验人手指部位活动的信号,运用人工神经网络进行手势捕捉,并应用一个分层隐马尔可夫模型结合前后手势的关联信息,精准实现了穿戴式设备的人机交互。此外,基于生物特征识别技术的穿戴式人机交互系统可以带来更自然、更轻松的交互体验[86]。总体而言,当前人机交互的智能化水平相比于人们的构想还存在较大的差距,需要进一步改善。

3 畜牧养殖信息监测穿戴方式比较

穿戴式监测方式直接影响对动物健康状况实时、动态、连续监测过程的可操作性及监测结果的稳定性和准确性。表 5 所示为穿戴式信息监测方式比较与分析,按照穿戴方式分为体内和体外监测,按照创伤程度分为微创和无创等。体外监测又分为束缚式和贴覆式,其中束缚式具有穿戴简单方便、价格便宜等优点,但容易脱落,受外界影响大,监测准确度较低,受动物大小限制;贴覆式监测方式常常受监测对象限制,很难连续监测,续航较差,并且需要安装工具,但该穿戴方式不易脱落。体内监测通常采取植入式将传感器微型装置导入体内,该监测方式监测精度高,不受监测对象大小限制,不易脱落,但价格比较昂贵,续航能力差,传输距离有限。无创穿戴方式通常监测精度较低,但对大多数监测对象的日常行为没有影响,续航能力较好;微创监测方式一般对监测对象的健康状况有轻微影响,但该穿戴方式不易受外界因素影响,监测准确度较高。

表 5 信息监测穿戴方式比较与分析

Tab. 5 Comparison and analysis of information monitoring wear methods

分类	监测方式	监测对象	监测参数	测量精度	优缺点	文献序号
穿戴方式	体外 束缚式	人	血压		穿戴简单方便,价格便宜;容易脱落,受外界影响大,监测准确度较低,受动物大小限制	[89]
		大鼠	心率	±78 次/min		[90]
		母猪	体温	±0.21℃		[17]
	体外 贴覆式	生猪	心率	0~0.9%	受监测对象限制,很难连续监测,需要安装工具,不易脱落,续航较差	[91]
		人	血压	$\pm 8.3\times10^{-4}$ MPa		[35]
		奶牛	体温	±0.20℃		[92]
	体内 植入式	奶牛	体温	±0.05℃	监测精度高,不受监测对象大小限制,不易脱落;价格比较昂贵,续航能力差,传输距离有限	[93]
		大鼠	心率			[94]
		人	血压	$\pm 1.33\times10^{-3}$ MPa		[95]
创伤程度	无创	奶牛	体温	±0.20℃	监测精度较低,对大多数监测对象的日常行为没有影响,续航能力较好	[92]
		人	血压			[89]
		大鼠	心率	±78 次/min		[90]
	微创	奶牛	体温	±0.05℃	对监测对象的健康状况有影响,不易受外界因素影响,监测准确度较高	[93]
		人	血压	$\pm 1.33\times10^{-3}$ MPa		[95]
		大鼠	心率			[94]

单个/网路:穿戴式设备具有监测一种或多种参数的功能,实现农场动物生理信息和环境信息感知,保证数据采集的实时性和可靠性,并且能高效率地进行数据采集、传输和记录,尽可能少的时间占用少的系统资源,对于多参数同时监测的情况下,是确保可穿戴设备正常运行的重要因素。周龙甫等[96]采用系统集成方式,整合多个传感器模块,完成整机设计实现了动态监测运动情况下的生命基本体征和周边环境信息,对于保证动物健康具有积极作用。

动物汗液中富含各种与疾病和健康有关的生物

标记物，通过对这些标记物的检测分析，可以监测动物身体健康状态。KOH 等[97]提供了一种微流体装置，定义了一组汗腺接入点，通过捕获汗液并对氯离子、葡萄糖、乳酸等标记物进行化学分析，从而达到健康监测的目的，监测结果包括汗液率、汗液流失等；GAO 等[98]提出了一种传感器阵列，用于多重原位汗液分析，穿戴式系统通过对汗液中的钠离子、皮肤温度等生物标记物进行检测，能够实时掌控汗液特征，该技术可以提供一种新的监测动物指标用于农场动物监测中，具有十分重要的研究意义。

体内/体外：与体外监测相比，植入体内监测具有较高精度，但缺点是操作不方便。何东健等[92]设计了一种植入式传感器和体温实时监测系统，将该植入式设备植入奶牛阴道内，能够有效对奶牛阴道部位的体温进行实时监测，虽然能够准确监测奶牛体温，但操作比较繁琐、较难控制、续航能力较差、影响动物日常生活和健康状况；ROSE 等[99]开发了一种贴附在表皮上的传感器贴片，实现了在智能终端上读取溶质和电位传感溶质和表面温度，操作方便而且不影响动物的日常生活和健康状况；纳米多孔铂电镀会产生极强的拉伸应力，尽管经过等离子体处理可提高粘附力，但仍会导致纳米多孔铂在柔性聚合物基体上剥落，YOON 等[100]通过改进柔性不锈钢解决了这一难题，并开发耐磨、坚固、灵活和非酶连续血糖监测系统，实验结果表明柔性不锈钢对提高金属层与基体的结合力有很好的效果，所开发的无线系统包括电化学分析电路、微控制器单元和无线通信模块，通过两种动物试验评估了连续血糖监测系统，显示出该植入式可穿戴血糖传感器具有良好生物相容性。

微创/无创：穿戴式设备工作过程一般为微创或无创方式，目的是尽量减少对农场动物的伤害，降低应激程度。屈东东等[93]设计了一种安装在奶牛耳道边沿的穿戴式设备用于监测奶牛的体温，该设备主要由数字温度传感器、基于 ARM9 的微处理器 S3C2440A 组成，实现了对群养奶牛体温的远程实时监测，为奶牛疾病及分娩期预测提供了有效工具，对其他大型动物的监测也具有一定的指导意义；KOH 等[97]提供一种柔软穿戴式的微流体装置，采用无创的方式紧密贴和皮肤表面，从而对汗液进行分析；针对现有基于脉搏波传导时间法或脉搏波特征参数法的血压测量模型存在的不足，谭霞等[101]提出利用平均影响值法从提取的脉搏波传导时间和脉搏波特征参数中优选出对血压影响较大的参数作为输入量，血压作为输出量训练 BP 神经网络模型，然后采用遗传算法对个性化参数进行优化，从而建立一种连续血压无创监测 GA－MIV－BP 神经网络模型。

4　发展趋势展望

畜牧养殖信息化已成为现代牧业的重要发展理念，有助于肉产品质量的安全可追溯，提升我国畜牧养殖体系的运作速度和质量，同时促进我国畜牧养殖基础数据和适合我国国情的信息化模式的形成。本文在现有研究成果的基础上，并借鉴穿戴式技术在人身上的应用情况，提出畜牧养殖穿戴式信息监测技术的发展趋势：

（1）信息获取方式由人工采集向自动化采集发展。传统的信息获取方式具有工作量大、主观性强、精度低等缺点，无法满足畜牧养殖业日益增长的实际需求。穿戴式信息监测技术集成多元传感技术与通信技术为一体，可实现对养殖场动物生理参数及环境参数的实时、连续与自动采集，从而保证了养殖场信息资源的高效获取。

（2）穿戴式传感器将向微型化和柔性化方向发展。传统的穿戴式设备功能单一，结构简单，且适应性较差，无法满足对养殖场动物的监测需求。随着柔性传感器和生物传感器等新型传感器的出现，穿戴式传感器逐渐具有了柔韧、可延展、可植入等功能，为穿戴式技术提供了新的研究思路。

（3）信号处理与信息传输将向多元化、复合化和智能化方向发展。穿戴式信号处理技术由单一的信号处理方法到多种信号处理方法相结合，克服单一方法在信号处理方面的局限性。信息传输更加快捷，近场通信技术（RFID/NFC）、短距离无线通信与较远距离无线通信并存，可满足不同应用场景的需求。这些技术的应用对于养殖场动物生理及其生活环境信息的获取具有重要实践意义。

（4）信息监测方式将向系统性、整体性和自适应方向发展。穿戴式技术的应用使信息获取方式更加多样化，将由单参数到多参数监测，体内监测到体外监测，微创监测到无创监测，单传感器监测到多传感网络监测，而且更加注重传感器分布形式和动物监测部位对监测过程可操作性和监测结果准确性的影响。

（5）穿戴式信息监测技术的应用将提高养殖管理与决策水平。借助于物联网平台，穿戴式设备将更加信息化，获取信息并将数据通过网络传输到管理平台，使决策更加及时和精准。信息化体系的构建能够更好地促进现代管理科学与农业生产结合，使畜牧养殖由传统的生产方式向精细化畜牧养殖系统发展。

参 考 文 献

[1] 尹晓青.我国畜牧业绿色转型发展政策及现实例证[J].重庆社会科学,2019(3):18 - 30.
YIN Xiaoqing. Policies and practical examples of transition and green development of animal husbandry in China[J]. Chongqing Social Sciences, 2019(3): 18 - 30. (in Chinese)

[2] 王国刚,杨春,王明利.中国现代畜牧业发展水平测度及其地域分异特征[J].华中农业大学学报(社会科学版),2018(6):7 - 13.
WANG Guogang, YANG Chun, WANG Mingli. Measurement and spatial distribution of the development level of animal husbandry's modernization in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition), 2018(6): 7 - 13. (in Chinese)

[3] NEETHIRAJAN S. Recent advances in wearable sensors for animal health management[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2017, 12: 15 - 29.

[4] NEETHIRAJAN S, TUTEJA S K, HUANG S T, et al. Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 98:398 - 407.

[5] ZHANG B, ZHUANG L, QIN Z, et al. A wearable system for olfactory electrophysiological recording and animal motion control [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2018, 307: 221 - 229.

[6] SALEEM K, SHAHZAD B, ORGUN M A, et al. Design and deployment challenges in immersive and wearable technologies [J]. Behaviour & Information Technology, 2017, 36(7): 687 - 698.

[7] MOON Y, MOTL R W, SOSNOFF J J. Monitoring gait in multiple sclerosis with novel wearable motion sensors[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2016, 97(10): e99 - e100.

[8] CHUNG S Y, LEE H J, LEE T I, et al. A wearable piezoelectric bending motion sensor for simultaneous detection of bending curvature and speed[J]. RSC Advances, 2017, 7(5): 2520 - 2526.

[9] DEGRAFF J, LIANG R, LE M Q, et al. Printable low-cost and flexible carbon nanotube buckypaper motion sensors[J]. Materials & Design, 2017, 133: 47 - 53.

[10] 韩志强,王海军,赵家平,等.动物发情鉴定技术的研究进展[J].畜牧兽医学报,2018,49(10):29 - 34.
HAN Zhiqiang, WANG Haijun, ZHAO Jiaping, et al. Research progress of estrus identification technology in animals[J]. Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2018, 49(10): 29 - 34. (in Chinese)

[11] 任亮,刘彩娟,罗清华.计步器监测系统对规模化牛场繁育工作的影响[J].中国奶牛,2017(7):26 - 29.
REN Liang, LIU Caijuan, LUO Qinghua. Effect of pedometer on the breeding work in dairy farms[J]. China Dairy Cattle, 2017(7): 26 - 29. (in Chinese)

[12] PONS P, JAEN J, CATALA A. Assessing machine learning classifiers for the detection of animals' behavior using depth-based tracking[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 86: 235 - 246.

[13] CUI Y, ZHANG M, LI J, et al. WSMS: wearable stress monitoring system based on IoT multi-sensor platform for living sheep transportation[J]. Electronics, 2019, 8(4): 441.

[14] DA COSTA C A, PASLUOSTA C F, ESKOFIER B, et al. Internet of health things: toward intelligent vital signs monitoring in hospital wards[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2018, 89: 61 - 69.

[15] ADNANE M, JIANG Z, CHOI S, et al. Detecting specific health-related events using an integrated sensor system for vital sign monitoring[J]. Sensors, 2009, 9(9):6897 - 6912.

[16] 胡良文,陈向东,吴坤,等.体温实时监测系统设计[J].电子设计工程,2019,27(1):140 - 143,148.
HU Liangwen, CHEN Xiangdong, WU Kun, et al. Design of human temperature real-time monitoring system[J]. Electronic Design Engineering, 2019,27(1): 140 - 143,148. (in Chinese)

[17] 柏广宇,刘龙申,沈明霞,等.基于无线传感器网络的母猪体温实时监测节点研制[J].南京农业大学学报,2014,37(5):128 - 134.
BAI Guangyu, LIU Longshen, SHEN Mingxia, et al. Design of sow body temperature monitoring node based on wireless sensor network[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(5): 128 - 134. (in Chinese)

[18] FOURNEL S, ROUSSEAU A N, LABERGE B. Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 96 - 123.

[19] MONTENY G J, BANNINK A, CHADWICK D. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(2 - 3): 163 - 170.

[20] WEEKLY K, JIN M, ZOU H, et al. Building-in-briefcase: a rapidly-deployable environmental sensor suite for the smart building[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1381 - 1401.

[21] KIM J S, CHUN K Y, HAN C S. Ion channel-based flexible temperature sensor with humidity insensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 271: 139 - 145.

[22] 陈镱,王绍源,陈清华. 基于无线传感网络的实时环境监测系统的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2018(9):79 - 83.
CHEN Yi, WANG Shaoyuan, CHEN Qinghua. Design and implementation of real time environmental monitoring system based on wireless sensor network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(9): 79 - 83. (in Chinese)

[23] 张蕾蕾,朱辰,郑敏,等.耳部佩戴型反射式无线血氧监测仪的研制[J].生物医学工程学进展,2018,39(3):130 - 134.

ZHANG Leilei, ZHU Chen, ZHENG Min, et al. The development of an ear-lead wireless reflectance pulse oximeter[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2018,39(3): 130 – 134. (in Chinese)

[24] 宋振耀,李景刚,曲国龙,等. 部队智能体温监测预警系统的构建[J]. 医疗卫生装备,2018,39(7):20 – 23,45.
SONG Zhenyao, LI Jinggang, QU Guolong, et al. Development of intelligent temperature monitoring and early warning system for troops[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2018, 39(7): 20 – 23,45. (in Chinese)

[25] 成文萍,吴锁柱,董文娟,等. 模式滤光光纤 pH 传感器的研究[J]. 分析科学学报,2011,27(4):409 – 412.
CHENG Wenping, WU Suozhu, DONG Wenjuan, et al. Study on a mode-filtered light optical fiber pH sensor[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(4): 409 – 412. (in Chinese)

[26] 马莹,王云峰,张海英,等. 基于压电薄膜传感器的心率呼吸率实时监测[J]. 传感器与微系统,2018,37(6):119 – 121.
MA Ying, WANG Yunfeng, ZHANG Haiying, et al. Real-time monitoring of heart rate and respiratory rate based on piezoelectric thin-film sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(6): 119 – 121. (in Chinese)

[27] 王萍萍,张晴,刘燕,等. 基于 TGAM 模块的穿戴式脑电波实时采集监护系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017(7): 75 – 79.
WANG Pingping, ZHANG Qing, LIU Yan, et al. Real-time wearable EEG acquisition and monitoring system based on TGAM module[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017(7): 75 – 79. (in Chinese)

[28] 倪天龙. 单总线传感器 DHT11 在温湿度测控中的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2010(6):60 – 62.
NI Tianlong. Application of single bus sensor DHT11 in temperature humidity measure and control system[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2010(6): 60 – 62. (in Chinese)

[29] 高云华. 一种新型农场气体无线智能监测系统的设计[J]. 湖北农机化,2018(10):35.

[30] VERMA G K, TIWARY U S. Multimodal fusion framework: a multiresolution approach for emotion classification and recognition from physiological signals[J]. NeuroImage, 2014, 102:162 – 172.

[31] KO K E, SIM K B. Deep convolutional framework for abnormal behavior detection in a smart surveillance system[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, 67:226 – 234.

[32] AZIZ N N A, MUSTAFAH Y M, AZMAN A W, et al. Features-based moving objects tracking for smart video surveillances: a review[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2018, 27(2): 1830001.

[33] PICARD A, DANIEL I. Pressure as an environmental parameter for microbial life—a review[J]. Biophysical Chemistry, 2013, 183: 30 – 41.

[34] LI T, WU Y, HUANG J, et al. Gas sensors based on membrane diffusion for environmental monitoring[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243:566 – 578.

[35] 李珊珊. 基于脉搏波的穿戴式连续血压监测方法的研究[D]. 南京:东南大学,2017.
LI Shanshan. Study on wearable continuous measurement method of blood pressure based on pulse wave [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[36] 蒋皆恢,徐俊,周虎成,等. 一款基于穿戴式的无创连续血压监测系统[J]. 中国医疗器械杂志,2018,42(6):400 – 404.
JIANG Jiehui, XU Jun, ZHOU Hucheng, et al. Wearable device for non-invasive continuously blood pressure monitoring[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2018, 42(6): 400 – 404. (in Chinese)

[37] 刘忠超,范伟强,张会娟,等. 基于 Android 的奶牛体温实时远程监测系统的设计[J]. 黑龙江畜牧兽医,2017(23):6 – 9, 282 – 283.
LIU Zhongchao, FAN Weiqiang, ZHANG Huijuan, et al. Design of real-time remote monitoring system for cow body temperature based on Android[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2017(23): 6 – 9,282 – 283. (in Chinese)

[38] 栾强厚,黄鑫,何敏娜,等. 一种无线可穿戴式动态体温监测系统的设计与实现[J]. 生物医学工程研究,2018,37(2): 215 – 218.
LUAN Qianghou, HUANG Xin, HE Minna, et al. Design and implementation of a wireless wearable dynamic temperature monitoring system[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2018, 37(2): 215 – 218. (in Chinese)

[39] 盛婷钰,方震,陈贤祥,等. 腕表式睡眠呼吸暂停监测系统设计[J]. 传感器与微系统,2018,37(7):96 – 98.
SHENG Tingyu, FANG Zhen, CHEN Xianxiang, et al. Design of wearable sleep apnea monitoring system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(7): 96 – 98. (in Chinese)

[40] 李龙,包俊,蒋绒颖,等. 基于 ZigBee 无线传感网络的光电脉搏心率监测系统[J]. 航天医学与医学工程,2017,30(5): 363 – 368.
LI Long, BAO Jun, JIANG Rongying, et al. Photoelectric pulse rate monitoring system based on ZigBee wireless sensor network[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2017, 30(5): 363 – 368. (in Chinese)

[41] 张宏,沈明霞,陆明洲,等. 穿戴式猪用心电监测系统设计[J]. 南京农业大学学报,2016,39(5):872 – 879.
ZHANG Hong, SHEN Mingxia, LU Mingzhou, et al. Design of wearable electrocardiogram monitoring system for pig[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016,39(5): 872 – 879. (in Chinese)

[42] 李宏恩,周晋阳,郝文延. 一种可穿戴呼吸实时监测系统的设计[J]. 科技通报,2017,33(6):78 – 81.
LI Hongen, ZHOU Jinyang, HAO Wenyan. Design of wearable respiratory real-time monitoring system[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(6): 78 – 81. (in Chinese)

[43] 陈真诚,宋浩,朱健铭,等. 基于光电容积脉搏波的呼吸监测系统研究[J]. 中国医学物理学杂志,2019,36(5):579 - 584.
CHEN Zhencheng, SONG Hao, ZHU Jianming, et al. Respiration monitoring system based on photolethysmography[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(5): 579 - 584. (in Chinese)
[44] 赵佳佳. 基于 STM32 的睡眠呼吸监测仪[J]. 现代计算机(专业版),2017(6):77 - 80.
[45] 施新泽,许琪. 一种改良的癫痫放电脑电波图监测方法[J]. 中国医学科学院学报,2019,41(1):53 - 56.
SHI Xinze, XU Qi. An improved method for electroencephalographic detection of epileptic discharge[J]. Acta Academiae Medicinae Sinicae, 2019, 41(1): 53 - 56. (in Chinese)
[46] 王朝瑾,袁金凤. 钨丝聚苯胺修饰的 pH 传感器在河鲫鱼分析中的应用[J]. 食品科学, 2007,28(8):441 - 443.
WANG Chaoyu, YUAN Jinfeng. Investigation on tungsten needle pH sensor modified by polyaniline film and applications for crucian pH detection[J]. Food Science, 2007,28(8):441 - 443. (in Chinese)
[47] 董猷琴. 用于 GERD 诊断的胶囊式 pH 监测系统的初步研发[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
DONG Youqin. Preliminary research on a capsule type of pH monitoring system for GERD diagnosis [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
[48] RUTTER S M. Graze: a program to analyze recordings of the jaw movements of ruminants[J]. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 2000, 32(1): 86 - 92.
[49] CLAPHAM W M, FEDDERS J M, BEEMAN K, et al. Acoustic monitoring system to quantify ingestive behavior of free-grazing cattle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(1):96 - 104.
[50] 宣传忠,武佩,张丽娜,等. 羊咳嗽声的特征参数提取与识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):342 - 348.
XUAN Chuanzhong, WU Pei, ZHANG Lina, et al. Feature parameters extraction and recognition method of sheep cough sound [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 342 - 348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160348&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.048. (in Chinese)
[51] WATANABE N, SAKANOUE S, KAWAMURA K, et al. Development of an automatic classification system for eating, ruminating and resting behavior of cattle using an accelerometer[J]. Grassland Science, 2008, 54(4): 231 - 237.
[52] NADIMI E S, SOGAARD H T, BAK T. ZigBee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 167 - 176.
[53] 尹令,刘财兴,洪添胜,等. 基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统设计[J]. 农业工程学报,2010,26(3):203 - 208,388.
YIN Ling, LIU Caixing, HONG Tiansheng, et al. Design of system for monitoring dairy cattle's behavioral features based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 203 - 208,388. (in Chinese)
[54] 张永会,高长青,王嵘. 脉搏波分析方法及其应用[J]. 北京生物医学工程,2019,38(3):319 - 326.
ZHANG Yonghui, GAO Changqing, WANG Rong. Methods of pulse wave analysis and its application[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2019, 38(3): 319 - 326. (in Chinese)
[55] 冯晨星,杨颖,徐国卿. 脉搏波频域分析中共振理论的研究进展[J]. 北京生物医学工程,2019,38(1):102 - 108.
FENG Chenxing, YANG Ying, XU Guoqing. Research progress of resonance theory in frequency domain analysis of pulse wave [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2019, 38(1): 102 - 108. (in Chinese)
[56] 沈劲鹏,王新安. 适用于床垫式生理信号监测系统的信号处理方法[J]. 北京大学学报(自然科学版),2018,54(5):921 - 926.
SHEN Jinpeng, WANG Xin'an. Signal processing method for mattress-type physiological monitoring[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(5): 921 - 926. (in Chinese)
[57] SHARMA H, SHARMA K K, BHAGAT O L. Respiratory rate extraction from single-lead ECG using homomorphic filtering [J]. Computers in Biology and Medicine, 2015, 59: 80 - 86.
[58] 熊建. 基于时频分析和复数域的模拟电路故障诊断研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.
XIONG Jian. Research on fault diagnostic methods for analog circuits based on time-frequency analysis and complex field analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
[59] HASSANPOUR H. A time-frequency approach for noise reduction[J]. Digital Signal Processing, 2008, 18(5): 728 - 738.
[60] 刘思佳,刘宏彬. 面向病人睡眠呼吸信号的非接触式测量与提取[J]. 自动化技术与应用,2018,37(9):143 - 146.
LIU Sijia, LIU Hongbin. Non-contact measurement and extraction of patient's sleep-breathing signal[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018,37(9): 143 - 146. (in Chinese)
[61] 王芳,季忠,彭承琳. 基于双树复小波变换的心电信号去噪研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(5):1160 - 1166.
WANG Fang, JI Zhong, PENG Chenglin. Research on ECG signal denoising based on dual-tree complex wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1160 - 1166. (in Chinese)
[62] AKAR S A, KARA S, BILGIC V. Investigation of heart rate variability in major depression patients using wavelet packet transform[J]. Psychiatry Research, 2016, 238: 326 - 332.
[63] 李梅. 一种改进的 Hilbert - Huang 变换时频分析方法[J]. 科技经济导刊,2016(16):23,19.
[64] 丑永新,祁春阳,金逸,等. 基于 Hilbert - Huang 变换的脉率变异性提取方法[J]. 中国医学物理学杂志,2018,35(4):425 - 430.
CHOU Yongxin, QI Chunyang, JIN Yi, et al. A Hilbert - Huang transform-based pulse rate variability extraction method[J].

Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(4): 425 - 430. (in Chinese)
[65] 陈茜,欧阳缉武,马新宇,等. 心电信号采集数字滤波算法优化[J]. 现代电子技术,2019,42(4):45 - 48,52.
CHEN Xi, OUYANG Shengwu, MA Xinyu, et al. Digital filtering algorithm optimization for ECG signal acquisition[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(4): 45 - 48,52. (in Chinese)
[66] 段力,庞宇,贺焱秋. 基于数字滤波的呼吸信号去噪研究[J]. 数字技术与应用,2016(2):69 - 70.
[67] 张志鹏. 一种人体动脉血氧饱和度无创检测方法研究[D]. 保定:河北大学,2011.
ZHANG Zhipeng. A non-invasive method for detecting oxygen saturation in human arteries [D]. Baoding: Hebei University, 2011. (in Chinese)
[68] ACHARYA D, RANI A, AGARWAL S, et al. Application of adaptive Savitzky - Golay filter for EEG signal processing[J]. Perspectives in Science, 2016, 8: 677 - 679.
[69] 赵素文,高凡,邓莉. 小波变换结合快速傅里叶变换从 PPG 中提取呼吸率[J]. 中国医学物理学杂志,2016,33(1):39 - 43.
ZHAO Suwen, GAO Fan, DENG Li. Respiratory rate extracted from photoplethysmography signals by using wavelet transform and fast Fourier transform[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(1): 39 - 43. (in Chinese)
[70] 殷俊鹏,田应洪,赖宗声,等. 基于小波域数字滤波的心电信号 BW 去噪算法[J]. 计算机工程,2013,39(3):267 - 271.
YIN Junpeng, TIAN Yinghong, LAI Zongsheng, et al. Electrocardiosignal baseline wander denoising algorithm based on digital filtering in wavelet domain[J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 267 - 271. (in Chinese)
[71] 郭洪量,李丹,张波,等. 一种面向穿戴式应用的超高噪声心电信号处理方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(2):84 - 89.
GUO Hongliang, LI Dan, ZHANG Bo, et al. A processing method of super-high noising ECG signal for wearable application [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(2): 84 - 89. (in Chinese)
[72] GERMAN-SALLO Z, STRNAD G. Signal processing methods in fault detection in manufacturing systems[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 22: 613 - 620.
[73] MICHIELLI N, ACHARYA U R, MOLINARI F. Cascaded LSTM recurrent neural network for automated sleep stage classification using single-channel EEG signals[J]. Computers in Biology and Medicine, 2019, 106: 71 - 81.
[74] GHADERYAN P, ABBASI A, EBRAHIMI A. Time-varying singular value decomposition analysis of electrodermal activity: a novel method of cognitive load estimation[J]. Measurement, 2018, 126: 102 - 109.
[75] 武彦,刘子帆,何东健,等. 奶牛体温实时远程监测系统设计与实现[J]. 农机化研究,2012,34(6):148 - 152.
WU Yan, LIU Zifan, HE Dongjian, et al. Design and implementation of real-time remote monitoring system for cow body temperature[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(6):148 - 152. (in Chinese)
[76] 李丽华,陈辉,于尧,等. 基于无线传输的蛋鸡体温动态监测装置[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):242 - 245,226.
LI Lihua, CHEN Hui, YU Yao, et al. Dynamic monitoring device of hens temperature based on wireless transmission[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 242 - 245,226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130642&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.042. (in Chinese)
[77] 王世平,王志武,颜国正. 基于 ZigBee 的可穿戴式病房无线监护系统[J]. 传感技术学报,2015,28(10):1563 - 1569.
WANG Shiping, WANG Zhiwu, YAN Guozheng. A wearable wireless monitoring system for ward based on ZigBee[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(10): 1563 - 1569. (in Chinese)
[78] 李年攸,吴杰良,丁鑫,等. 基于 Arduino 的大型家禽养殖场监控系统设计与实现[J]. 三明学院学报,2019,36(2):46 - 50.
LI Nianyou, WU Jieliang, DING Xin, et al. Design and implementation of monitoring system for large poultry farm based on Arduino[J]. Journal of Sanming University, 2019, 36(2): 46 - 50. (in Chinese)
[79] 吴振宇,李华龙,李航. 基于蓝牙 4.0 和 GSM 的无线心率监测仪设计[J]. 计算机测量与控制,2015,23(2):664 - 667.
WU Zhenyu, LI Hualong, LI Hang. Design of wireless heart rate monitor based on Bluetooth 4.0 and GSM[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 664 - 667. (in Chinese)
[80] 刘忠超,范伟强,常有周,等. 基于 ZigBee 和 Android 的牛舍环境远程监测系统设计[J]. 黑龙江畜牧兽医,2018(17):61 - 64,234.
LIU Zhongchao, FAN Weiqiang, CHANG Youzhou, et al. Design of remote monitoring system for cowshed environment based on ZigBee and Android[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018 (17): 61 - 64,234. (in Chinese)
[81] 于晓婷,程坤. 基于 NFC 技术的畜牧业免疫管理系统设计[J]. 电子技术与软件工程,2018(22):51.
[82] MA C, WANG Y, YING G. The pig breeding management system based on RFID and WSN[C]//2011 Fourth International Conference on Information and Computing. IEEE, 2011: 30 - 33.
[83] 胡郁,严峻. 智能语音交互技术及其标准化[J]. 信息技术与标准化,2015(4):14 - 17.
HU Yu, YAN Jun. Intelligent speech interaction technology and its standardization [J]. Information Technology & Standardization, 2015(4): 14 - 17. (in Chinese)
[84] 陈艳丽,金纪东,陈国涛. 手部姿势与挥动速度识别的人机交互[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(1):56 - 61.
CHEN Yanli, JIN Jidong, CHEN Guotao. Human-computer interaction of hand posture and waving speed recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(1): 56 - 61. (in Chinese)

[85] 杨庆华,张达磊,荀一. 面向人机交互的眼动跟踪方法研究[J]. 机电工程, 2016,33(7):904 - 908.
YANG Qinghua, ZHANG Dalei, XUN Yi. Eye-gaze tracking method for HCI system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(7): 904 - 908. (in Chinese)

[86] ZHANG Y P, XU X P. Design of a wearable human-computer interaction system based on bioelectrical signal recognition technology[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2018, 21(5): 1049 - 1054.

[87] MALASSIOTIS S, STRINTZIS M G. Real-time hand posture recognition using range data[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(7): 1027 - 1037.

[88] 盛卫华,祝纯. 人机交互中基于可穿戴式计算的手势和活动辨识(英文)[J]. 山东大学学报(工学版),2010,40(3):37 - 50.
SHENG Weihua, ZHU Chun. A wearable computing approach for hand gesture and daily activity recognition in human-robot interaction[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2010, 40(3): 37 - 50. (in Chinese)

[89] 郭旭. 个性化可穿戴式血氧与血压无创监测系统[D]. 沈阳:东北大学,2013.
GUO Xu. Personalized wearable non-invasive saturation and blood pressure monitoring[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)

[90] 吴艳茹,司伟,易小林,等. 小动物无创式心率监测仪的研制及应用[J]. 郑州大学学报(医学版),2012,47(6):794 - 797.
WU Yanru, SI Wei, YI Xiaolin, et al. Exploitation of a noninvasive small animal's heart rate measuring apparatus[J]. Journal of Zhengzhou University(Medical Sciences), 2012, 47(6): 794 - 797. (in Chinese)

[91] 陈桂鹏,秦文婧,丁建,等. 基于物联网技术的生猪存亡远程监测系统设计与验证[J]. 中国农业科学,2017,50(5):942 - 950.
CHEN Guipeng, QIN Wenjie, DING Jian, et al. Designing and validation of the remote monitoring system for pigs' survival based on IoT technology[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(5): 942 - 950. (in Chinese)

[92] 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)

[93] 屈东东,刘素梅,吴金杰,等. 群养奶牛体温实时监测系统设计与实现[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):408 - 412.
QU Dongdong, LIU Sumei, WU Jinjie, et al. Design and implementation of monitoring system for multiple cows body temperature[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.): 408 - 412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2016s062&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.062. (in Chinese)

[94] 陈卫红,杨益民,叶树明. 小动物监测的植入式低功耗无线系统研究[J]. 传感器与微系统,2012,31(4):60 - 62,66.
CHEN Weihong, YANG Yimin, YE Shuming. Study on implantable low-power consumption wireless system for small animal monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(4): 60 - 62,66. (in Chinese)

[95] 吕粉云,王文华,张丹丹. 有创动脉压的监测及护理[J]. 医学理论与实践,2019,32(2):272 - 273.
LÜ Fenyun, WANG Wenhua, ZHANG Dandan. Monitoring and nursing of invasive arterial pressure[J]. The Journal of Medical Theory and Practice, 2019, 32(2): 272 - 273. (in Chinese)

[96] 周龙甫,刘传银,张雅勤,等. 可穿戴式生命体征及环境信息移动监测装置研制[J]. 医疗卫生装备,2017,38(12):16 - 19.
ZHOU Longfu, LIU Chuanyin, ZHANG Yaqin, et al. Development of wearable monitor for human vital signs and environment information[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(12): 16 - 19. (in Chinese)

[97] KOH A, KANG D, XUE Y, et al. A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat[J]. Science Translational Medicine, 2016, 366(8): 366ra165.

[98] GAO W, EMAMINEJAD S, NYEIN H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis[J]. Nature, 2016, 529(7587): 509 - 514.

[99] ROSE D P, Ratterman M E, GRIFFIN D K, et al. Adhesive RFID sensor patch for monitoring of sweat electrolytes[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 62(6): 1457 - 1465.

[100] YOON H, XUAN X, JEONG S, et al. Wearable, robust, non-enzymatic continuous glucose monitoring system and its in vivo investigation[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 117: 267 - 275.

[101] 谭霞,季忠,张亚丹. 基于 GA 优化的 MIV - BP 神经网络连续血压无创监测方法研究[J]. 振动与冲击,2019,38(9):71 - 79.
TAN Xia, JI Zhong, ZHANG Yadan. Non-invasive continuous blood pressure monitoring method based on GA - MIV - BP neural network model[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(9):71 - 79. (in Chinese)