

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.041

基于偏度聚类的哺乳期母猪声音特征提取与分类识别

闫丽^{1,2} 邵庆¹ 吴晓梅³ 谢秋菊¹ 孙昕⁴ 韦春波⁵

(1. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 163319; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031;

(3. 国网黑龙江省电力公司黑河供电公司, 黑河 164300; 4. 哈尔滨医科大学基础医学院, 哈尔滨 150081;

5. 黑龙江八一农垦大学动物科技学院, 大庆 163319)

摘要: 哺乳期是母猪繁育仔猪的关键时期, 哺乳母猪特有的发声是其生理、情绪健康及其对仔猪看护的母性能力的最直接表达。哺乳期间母猪所发声音种类众多, 增加了快速定位及准确识别特定声音类型的复杂度, 以小梅山母猪的哺乳声、饮水声、采食声及无食咀嚼声等常见声音为研究对象, 以功率比作为特征向量, 对频域进行更精细的能量计算, 提出基于偏度的子带聚类法合并特征不显著的子带, 减少特征向量数量, 构建支持向量机(SVM)的声音分类识别器, 统计各类声音的发声时长; 进一步以单个哺乳周期为对象, 建立成功哺乳的声音模式。试验结果表明, 哺乳声、无食咀嚼声、采食声和饮水声的最大功率比分别位于[0 Hz, 1 000 Hz]、[1 000 Hz, 1 500 Hz]、[1 500 Hz, 2 500 Hz]和[2 500 Hz, 8 000 Hz]子带内, 以4个子带的功率比为特征的声音判别模型的识别率分别为100%、100%、95.17%、96.61%, 与等间隔子带划分及主成分分析法比较, 减少了特征向量的数量, 且显著提高了识别算法的精度, 进一步应用在母猪分娩舍内, 实现了对哺乳母猪的母性能力及其健康状况的无应激、实时监测。

关键词: 哺乳母猪; 声音识别; 偏度; 聚类; 降维; 哺乳模式

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0300-07

Feature Extraction and Classification Based on Skewness Clustering Algorithm for Lactating Sow

Yan Li^{1,2} Shao Qing¹ Wu Xiaomei³ Xie Qiuju¹ Sun Xin⁴ Wei Chunbo⁵

(1. College of Information and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

3. Heihe Power Supply Company, State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Heihe 164300, China

4. School of Basic Medical Sciences, Harbin Medical University, Harbin 150081, China

5. College of Animal Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The lactation period is a critical period for sows to breed their piglets, and the specific voice of lactating sows in this period is the most direct expression of their physiology, emotional health, and maternal ability to care for piglets. The rapid location and accurate identification will be more complex due to a variety of vocalizations during this period. Therefore, the vocalizations of nursing grunt, drinking, feeding and sham chewing were observed, and a fine energy calculation for frequency domain with a power ratio as a vector was carried out. Then, the sub-band clustering method based on skewness was presented to merge the sub bands without significant characteristics to reduce the number of parameters. Thirdly, the recognizer for sow's vocalizations was built based on support vector machine (SVM) to calculate the duration of the different types of vocalization. A sound mode of successful nursing was established further within single lactation circle. It is shown that the max power ratio frequency

收稿日期: 2015-10-17 修回日期: 2016-01-20

基金项目: 黑龙江省青年科学基金项目(QC2014C078、QC2013C031)、黑龙江省教育厅科研项目(12541493)和大庆市指导性科技计划项目(szdjy-2015-23)

作者简介: 闫丽(1979—), 女, 副教授, 南京农业大学博士生, 主要从事设施养殖研究, E-mail: bynd_yanli@163.com

domain of the nursing grunt, the sham chewing, the feeding and the drinking are ranged from 0 Hz to 1 000 Hz, 1 000 Hz to 1 500 Hz, 1 500 Hz to 2 500 Hz, and 2 500 Hz to 8 000 Hz, respectively. The accuracy of the vocalization recognition mode with these four sub bands power ratio frequency as parameters were 100%, 100%, 95.17% and 96.61%, respectively. Compared with the uniformly-spaced sub-band division and principal component analysis (PCA), the number of features was reduced, and the recognition accuracy was significantly improved in the clustering algorithm based on skewness. Thus, the proposed method could be further applied in the health and maternal ability of sows monitoring real-timely and nonstressly.

Key words: lactating sow; vocalization recognition; skewness; clustering; dimension reduction; nursing mode

引言

行为既是动物对环境适应性的表现,又与其心理感受存在一定映射关系,动物行为专家常将行为正常与否作为判定动物福利的黄金标准^[1-2]。声音是行为学研究的重要组成部分,无应激、非接触的数据采集方式可应用于畜禽养殖场,通过音频分析技术挖掘数据所蕴含的与健康及环境舒适性相关的深层“语义”,指导养殖人员建立符合农场动物自然习性的生产方式。

养殖场环境声音繁杂,包括动物叫声、动物与设备互作的响声,以及机械设备运行的噪声。然而,机械设备运转产生的噪声往往干扰音频的品质,通过滤波器^[3-4]、小波阈值去噪^[5-6]等方法加以去除,确保获得高品质的音频。动物叫声中表达着丰富的含义,以家猪为例,通常低频、低音的叫声是种群内部彼此交流及认知的“语言”^[7],而高频、尖利的叫声则是对自身机体需求及其刺激程度的反馈^[8-9]。采食、饮水行为异常是健康异常的信号,利用与采食设备碰撞次数^[10]、咬断食物的频率^[11]、饮水时长^[12-13]实现禽畜采食、饮水量的智能监测。

母猪是猪场最主要的生产力,其哺育后代的能力及健康状况将直接影响养殖场的经济效益。母猪发出“哼哼呼噜”的唤乳声吸引仔猪前来吮乳,并通过哼叫速率的改变引导仔猪在按摩与吮乳之间变换。随着商业养猪规模的不断扩大,通过现代选育技术培育的瘦肉型猪种的母性行为有所减弱,其中哺乳声音特征越来越不明显,甚至消失;然而,以世界产仔冠军小梅山母猪为代表的我国地方猪种的母性表现尤为突出。因此,本文以江苏地方猪种小梅山母猪为研究对象,采集哺乳期第11天起连续18 d的声音数据,结合哺乳声、饮水声、采食声及无食咀嚼声的频域特征,以子带功率比为特征向量,提出基于偏度的聚类算法实现特征降维,构建哺乳母猪的声音识别器;进一步依据单个哺乳周期构建成功哺

乳的声音模式,以期应用于养殖场实际环境,为后期母猪生理、心理健康及母性能力综合评价提供理论依据。

1 基于偏度聚类的母猪声音识别算法

1.1 基于子带功率比的特征选择

功率比(Power ratio)是信号的子带功率占整个频域总功率的比值,常作为数字信号的特征识别参数^[14-15],即

$$p_u = \frac{W_u}{W} \quad (1)$$

其中, W_u 是子带 $[l_u, h_u]$ 的功率,设 $S_x(f)$ 为Welch方法计算对应频率 f 所携带的功率谱密度,则有

$$W_u = \int_{l_u}^{h_u} S_x(f) df \quad (2)$$

而总功率为

$$W = \sum_{u=1}^n W_u \quad (3)$$

式中,对频域 $[0, f_s/2]$ 采用均匀法划分为 n 个子带,则声音 i 子带 u 对应的功率比记为 $p_{i,u}$,其中 $u=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$ 。

以 p 为特征向量实现声音的识别,其中特征的数量随子带数 n 变化, n 增加,识别算法的复杂度也随之增加,例如,以子带最大功率比为特征进行蛋鸡叫声识别^[5],但该方法对子带划分的要求极高,因此,本文提出一种通用的聚类算法,以各声音特征分布为先验知识,对同类相邻子带进行合并,实现特征向量降维的同时,提高分类识别准确率。

1.2 基于偏度聚类的特征选择方法

1.2.1 相关定义

偏态系数(Skewness):又称偏度,用于度量数据分布的非对称程度^[16],计算公式为

$$k_u = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{i,u} - \bar{p}_u)^4}{(m-1)s_u^4} \quad (4)$$

式中, \bar{p}_u 和 s_u^2 分别为子带 u 的各声音的功率比均值及方差。 $k \neq 0$, 说明数据分布存在距离均值较远的离散值, $k < 0$, 则离散值位于均值左侧的极小值, 而 $k > 0$, 离散值位于均值右侧的极大值点。以偏态系数计算同一子带不同声音(3种以上声音)功率密度比的显著性差异。

子带合并: 当且仅当 $h_u = l_v$, 子带 u, v 合并, 即相邻子带允许合并。合并后, 子带的频域为 $[l_u, h_v]$, 功率比是 $p'_{i,u} = p_{i,u} + p_{i,v}$, 依据式(4)更新偏态系数, 记为 k'_u 。

合并判别式矩阵 $C = [c_{u,v}]$, 其中

$$c_{u,v} = \begin{cases} k_u & (v = u) \\ k'_u & (v = u + 1) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, 若 $c_{u,v} > c_{u,u}$, 即相邻子带 u 与 v 合并。

1.2.2 基于偏度的子带聚类方法的步骤

1.2.2.1 同类别相邻子带合并 S1

(1) 已知初始功率比为 $p_{i,u}$, 其中 u 是子带下标, i 表示声音类型, 计算合并判别式矩阵 C 。

(2) $\forall u \neq v$, 若 $c_{u,v} \geq c_{u,u}$, 则 u 与 v 合并, 更新合并判别式矩阵 C' 。

(3) 直至不出现新的合并, 执行 S2, 否则, 执行步骤(2)。

1.2.2.2 不同类别相邻子带合并 S2

(1) $\forall u \neq v$, 若 $c_{u,v} \geq c_{v,v}$, 则 u 与 v 合并, 更新合并判别式矩阵为 C' 。

(2) 直至不出现新的合并, 程序结束; 否则, 执行 S1 步骤(2)。

1.2.3 基于偏度的子带聚类的特点

偏度聚类的设计原则: 以所有子带作为初始聚类中心, 按照相邻子带间合并判别式数值大小进行合并, S1 实现同类声音合并使相邻子带功率比趋于最大; 为进一步减少聚类数量, S2 将功率比近似等于零的子带与不同类别相邻子带合并。

1.3 训练支持向量机(SVM)多分类模型

SVM 将非线性可分的特征向量经非线性变换映射到高维空间, 并利用最优超平面解决二分类问题, 根据待识别的声音种类建立等数量的二值分类器, 选取其中最大值所对应的类型, 即为声音分类的结果。

2 试验

2.1 数据采集

本试验在江苏省句容市小梅山原种猪场的母猪分娩舍内进行, 选择5头生产10d的小梅山母猪及其新生仔猪为试验对象, 将每头母猪及其仔猪饲养

在离地30cm的2.2m×1.8m(长×宽)高床限位栏中。限位栏可保护新生仔猪免遭挤压; 然而, 宽0.6m的空间也限制了哺乳母猪正常行为的表达, 使其头部仅朝一个方向站立、坐及躺卧。采食槽和饮水器分别位于母猪限位区前端及左侧供母猪采食湿饲料及清水, 乳头饮水器位于栏体后部供仔猪自由饮用。选用Takstar生产的PC-K600型传声器(频率响应0.02~20kHz, 灵敏度(-36±2)dB)放置在采食槽与饮水器夹角外侧距离地板70cm高度处, 以防止母猪触碰干扰, 选用MP3Recorder录音软件, 设置采样频率 f_s 为16kHz、16位、单声道采集的音频数据, 以.wav格式存储于现场服务器, 配以海康威视DS-2CE5582P型摄像头、海康威视DS-7924H-SH型24路硬盘录像机及2TB硬盘于2015年1月18日—2月4日实现24h不间断记录限位栏内音、视频; 并进一步结合文献[17]方法, 通过皮带固定MPU6050节点于母猪颈部下方, 采集母猪的三轴加速度数据。

2.2 去噪

实际的母猪分娩舍内往往存在嘈杂的环境噪声, 包括动物叫声、动物与设备互作的响声, 以及机械设备运行的噪声, 实际采集的声音往往是一种或多种噪声与母猪发声的混叠, 此时信号被淹没在强噪声中, 其中机械设备运转产生的噪声往往干扰音频的品质, 故通过滤波器、小波阈值去噪等方法加以去除, 确保获得高品质的音频; 同时, 哺乳母猪与其仔猪共同生活, 仔猪的叫声也极大影响母猪哺乳发声的准确定位, 利用log energy熵二次小波包去噪法^[18]可有效去除仔猪尖叫声及粉红噪声、白噪声等残留环境噪声, 实现母源声音损失尽量最小。

2.3 声音类型及特征

2.3.1 发声种类

(1) 哺乳声

母猪发出的哺乳声是一种吸引仔猪吮奶的信号, 类似于人打鼾发出的呼噜声, 呼噜频率与母乳的排出存在固定关系, 有助于建立母仔间采食行为模式。同时, 哺乳声是母猪母性行为良好的重要表现, 可作为母性行为评价的标准之一, 声音时域信号和频域特征如图1a所示, 其峰值及主要能量集中在[0 Hz, 500 Hz]。

(2) 采食、饮水声

采食和饮水是母猪生长及维持身体机能的正常生理需求, 采食量及饮水量异常是猪只健康异常的警报信号。设猪场饮水管的水流速恒定, 则饮水时长与其饮水量成正比关系^[13]; 同理, 采食时长与采食量成线性关系^[10]。通过采集采食、饮水发声估算

采食、饮水量,了解猪只的身体健康状况,其中饮水声音由喝水声及吞咽声多个音节组成,频域信号出现多个主峰,分别在 $[1\ 000\ \text{Hz}, 2\ 000\ \text{Hz}]$ 和 $[3\ 000\ \text{Hz}, 4\ 000\ \text{Hz}]$,见图1b;而图1c中采食声音则由咀嚼和吞咽多音节组成,其能量主峰集中在子带 $[1\ 000\ \text{Hz}, 2\ 000\ \text{Hz}]$ 和 $[5\ 000\ \text{Hz}, 6\ 000\ \text{Hz}]$ 。

(3) 无食咀嚼声

无食咀嚼是指无食物下,口部重复出现上下腭的咬合动作,其声音的时、频域特征如图1d所示,是限饲、限位等因素引起哺乳期母猪行为规癖的常见表现之一,属于一种慢性应激综合症,这种规癖行为的表现时间会随着胎次增加而增加,影响母猪正常的休息时间。

总之,哺乳期间母猪所发声音种类众多,在复杂的干扰声中,快速定位及识别出其中一种声音具有

一定难度。

2.3.2 声音特征

设初始子带数 $n = 16$,将 $[0, f_s/2]$ 等间隔划分为 $[0, f_s/32]$ 、 $[f_s/32, f_s/16]$ 、 \dots 、 $[15f_s/32, f_s/2]$,分别计算这4种声音不同子带的功率比,如图2a所示,其功率比数值分布存在显著差异,其中哺乳声能量集中在 $[0\ \text{Hz}, 2\ 000\ \text{Hz}]$ 内,最大值出现在子带 $[0\ \text{Hz}, 500\ \text{Hz}]$;无食咀嚼声能量分布在 $[800\ \text{Hz}, 3\ 000\ \text{Hz}]$ 频带内,功率的最大值位于 $[1\ 000\ \text{Hz}, 1\ 500\ \text{Hz}]$ 范围内;而采食声与饮水声的能量分布几乎覆盖了整个频域,同时存在多处显著的重复,但采食声的最显著能量点位于 $[2\ 000\ \text{Hz}, 2\ 500\ \text{Hz}]$,而饮水声的最大功率比出现在 $[3\ 500\ \text{Hz}, 4\ 000\ \text{Hz}]$,且采食声与饮水声功率比在 $[1\ 500\ \text{Hz}, 2\ 500\ \text{Hz}]$ 和 $[3\ 500\ \text{Hz}, 4\ 500\ \text{Hz}]$ 间差异显著。

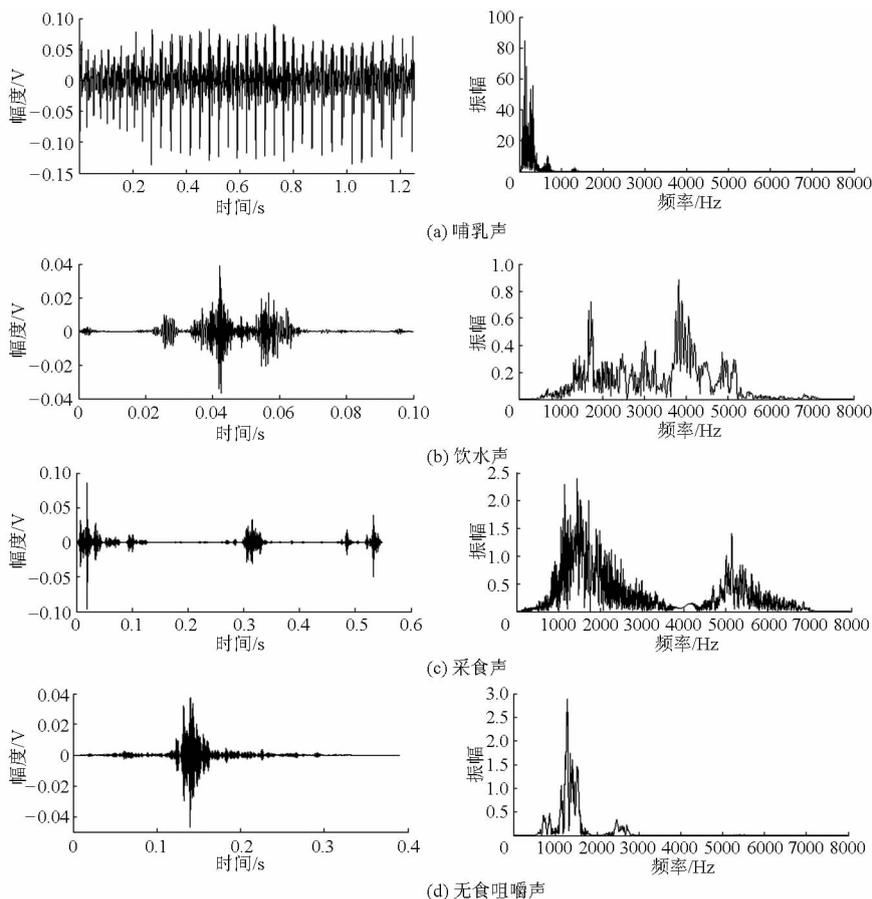


图1 母猪常见的发声类型及其频域特征

Fig. 1 Time- and frequency- domain feature of vocalization in sows

3 结果与分析

3.1 偏度聚类结果

利用1.2节描述的子带聚类算法进行聚类,其过程如图2所示。首先,将频域等分为16子带,设每个子带为一个初始聚类中心;其次,根据合并判别式矩阵的数值,使偏态系数增加的相邻子带进行合并,聚类结果如图2b;尽管子带 $[6\ 500\ \text{Hz},$

$7\ 000\ \text{Hz}]$ 和 $[7\ 000\ \text{Hz}, 8\ 000\ \text{Hz}]$ 上功率比最大值所对应的声音种类不同,但4种声音的功率比最大值已近似等于0,将其合并的结果如图2c所示;重复执行聚类算法,进一步合并,最终得到图2d所示的 $[0\ \text{Hz}, 1\ 000\ \text{Hz}]$ 、 $[1\ 000\ \text{Hz}, 1\ 500\ \text{Hz}]$ 、 $[1\ 500\ \text{Hz}, 2\ 500\ \text{Hz}]$ 和 $[2\ 500\ \text{Hz}, 8\ 000\ \text{Hz}]$ 4个子带,计算每个子带的功率比 p'_i 作为声音类型*i*的特征向量。

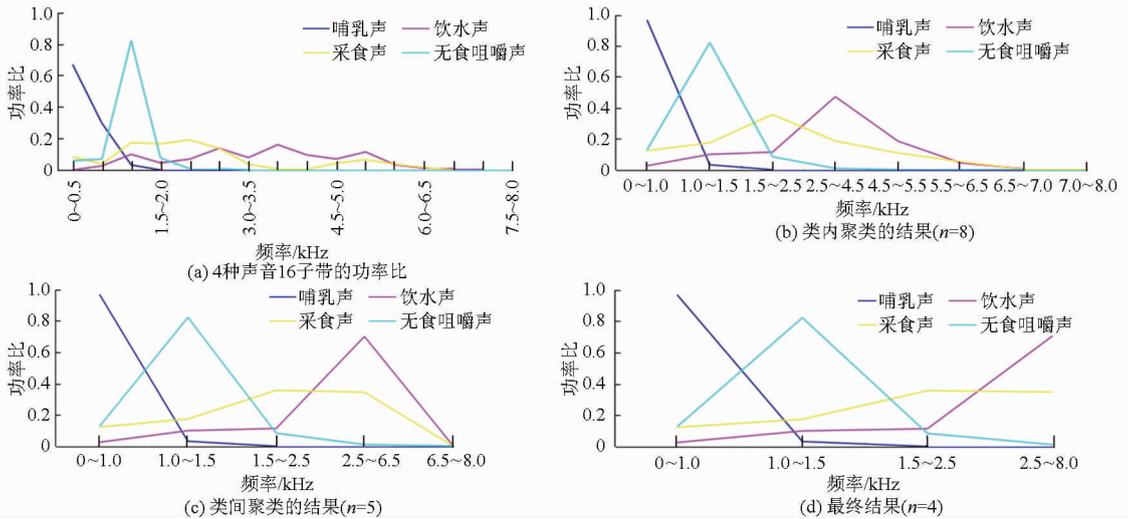


图2 偏度聚类算法的过程

Fig.2 Steps of clustering algorithm on skewness

3.2 识别率

将4种声音类型811个待分类样本按照2:1比例分成训练集和测试集训练SVM分类判别模型,并结合10折交叉验证方法计算识别率。表1中,含16个初始参数作为特征向量的判别效果不佳,其中采食声音的识别率仅为77.78%;采用主成分分析(PCA)的降维方法,选择主成分1~6为特征向量,其累积贡献率为92.34%,能够解释绝大多数变量,同时提高了识别率,其中采食声音的识别率达到88.94%;利用偏度聚类算法,进一步实现类内内聚、类间耦合的聚类原则,且各类型声音识别效果均有显著提高,其中采食声音的识别率最低,亦达到95.17%,哺乳声音和无食咀嚼声音特征更加突出,识别率高达100%。将偏度聚类结合PCA,试图进一步减少特征参数,但判别的效果不理想。

表1 不同特征向量组合的SVM识别率

声音类型	样本数	特征向量($n=16$)		偏度聚类法($n=4$)	
		无PCA	结合PCA	无PCA	结合PCA
哺乳声	204	97.90	100	100	100
饮水声	202	88.89	88.39	96.61	92.14
采食声	203	77.78	88.94	95.17	87.17
无食咀嚼声	202	95.58	97.55	100	100

试验中多音节组成的采食声误判率最高,其主要原因是哺乳母猪喂养以食用湿料为主,通过干饲料与乳清或水混合制成,有助于提高消化率、降低料重比,获得更好的生产性能,因此采食声音中包含有食物入口、咀嚼和吞咽的声音,由于湿料中含水分比例较高,导致采食声与饮水声的错判。然而母猪发出的无食咀嚼声因嘴里缺少了食物摩擦,即只有上

下牙齿咬合发声,较之多音节组成的采食声频域范围小,识别率也较高。

3.3 哺乳声音模式

图3a是2号母猪发出的一个65s哺乳声音周期,其中用红色竖线分割哺乳声音节,以5s为间隔统计音节个数、音节的平均间隔及平均持续时长,如图4所示。首先,前20s内,哺乳声的频率是稳定的,即为0.6Hz,单个哺乳声的时长呈现增长趋势,且音节间隔固定,该声音可吸引仔猪靠近并按摩母猪;20~35s,哺乳声的频率快速增加至2Hz,单个哺乳声变得短促,引导仔猪由按摩变为吮乳;35~60s,哺乳声频率由最大值快速降至0.2Hz,与视频录像对照结果显示,仔猪在40~55s吮乳,随着吮乳结束,伴着哺乳声继续按摩,直至65s哺乳声音消失;图3b为对应的加速度曲线,从12:27:19开始, z 轴加速度数值近似为0,表示母猪处于侧卧姿态, y 轴等于-1,进一步明确此时的体位为左侧姿,该姿态持续至12:28:36用黑色竖线标志,该时刻母猪从左侧卧变换到其它姿态,与声音分析及视频观察的结果吻合,标志着这次哺乳过程结束。

总之,母猪的哺乳模式如图5所示,母猪身体侧卧、乳头外露,嘴部发出有节奏的“哼哼呼噜”的哺乳声,频率为0.5~1.0Hz,哺乳声持续20~80s,随着仔猪按摩刺激母猪,引起其催产素释放,哼叫频率增加,并在短时间15s内达到峰值2~4Hz,此时,呼噜声与催产素释放是同步的;然而,催产素释放导致血液中催产素浓度增加,直至催产素到达乳房,引起乳房内压增加、母乳的排出需要15~25s。放乳期间,哺乳声频率不断减少,直至消失;放乳结束,仔猪由吮乳变为后按摩;最后,由母猪(母猪改变姿态)或仔猪(仔猪离开)作为此次哺乳结束者。

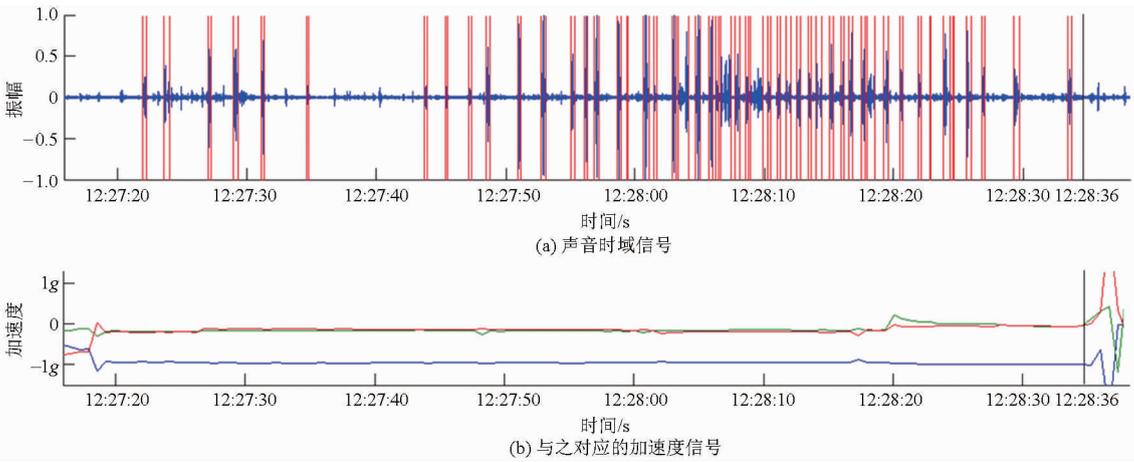


图3 母猪哺乳周期内声音及加速度曲线

Fig.3 Curves of vocalization and acceleration in single nursing

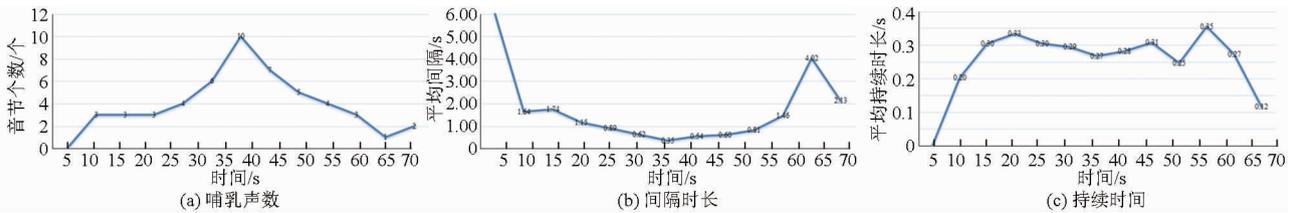


图4 一次哺乳相关参数统计

Fig.4 Statistics on three parameters in single nursing

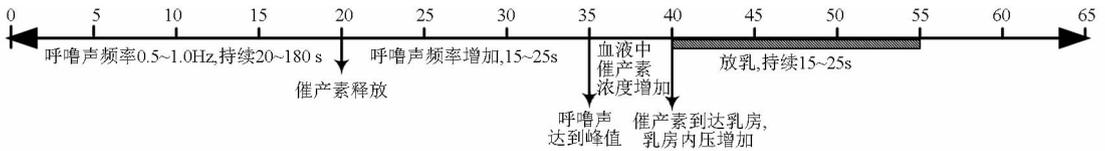


图5 哺乳模式

Fig.5 Pattern of milk letdown

3.4 统计

利用上述方法,分别统计5头母猪(分娩的详细信息参见表2)哺乳期11~20 d和21~28 d所发出各类声音的时长均值,如图6所示。结果表明:与11~21 d比较,21~28 d每日哺乳总时长缩短了80 min以上,表明母猪已有主动断奶的强烈意愿;然而同一哺乳期内,21~28 d的无食咀嚼时长也明显高于11~20 d的,同时随着分娩胎次的增多,11~20 d无食咀嚼发声的时长也有显著增加,其中1~3号母猪无食咀嚼的发声时长低于20 min,而4、5号母猪产仔10胎及以上,其无食咀嚼的平均时长已超过60 min,说明无食咀嚼是长期限饲、限位的慢性应激造成的,胎次少的母猪相对的应激影响也较轻;以4号母猪为例,其11~20 d的哺乳和无食咀嚼时长分别为235、67 min,而21~28 d时其数值分别为117、90 min,其应激反应严重且哺乳能力不足,已经影响到仔猪断奶前的生长,因此从母性评价的角度出发,应该考虑将其淘汰。试验结果表明无食咀嚼时长与胎次相关,而目前每个胎次的样本量较少,今后将就此问题详细研究。总体来看,母猪的哺乳期

2个阶段的饮水和采食时长较稳定,没有出现异常变化,根据文献[19-20]判断哺乳期11~28 d母猪身体状况正常。

表2 母猪分娩信息

Tab.2 Information of sows' farrowing

序号	1	2	3	4	5
胎次	1	1	3	10	12
产仔数	8	6	14	6	18

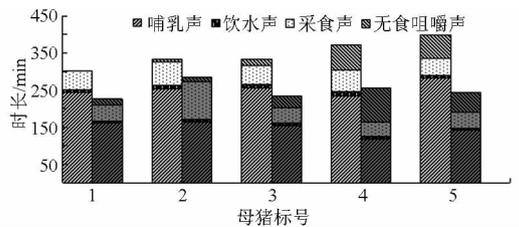


图6 母猪各类声音发声时长统计

Fig.6 Duration of all kinds of vocalization in sow

4 结论

(1)提出利用偏度系数的聚类算法进行特征降维,选择4个子带的功率比为特征构建哺乳期母猪的声音识别器,与等间隔子带划分及主成分分析法

比较,减少特征数量、提高算法的识别精度,哺乳、饮水、采食及无食咀嚼声音的识别率达到了100%、96.61%、95.17%和100%。

(2)以单个哺乳周期为对象,建立成功哺乳的声音模式,进一步统计母猪整个哺乳期内的哺乳声音,以此获得哺乳期内母猪的哺乳规律。

(3)从养殖声音数据中自动区分并计算每头母猪4种声音的时长信息,统计数据显示:哺乳期后期哺乳声音时长缩短,母猪表现出强烈的断奶意愿;随着分娩胎次及哺乳时间增加,无食咀嚼时长显著增加,母猪长期受到限位栏的空间限制及刺激贫瘠影响,慢性应激反应加重。

参 考 文 献

- 1 DAWKINS M S. Behaviour as a tool in the assessment of animal welfare[J]. *Zoology*, 2003, 106(4):383-387.
- 2 STEVENS B, KARLEN G M, MORRISON R, et al. Effects of stage of gestation at mixing on aggression, injuries and stress in sows[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2015, 165(4):40-46.
- 3 ERIKSSON L J, ALLIE M C, GREINER R. The selection and application of an IIR adaptive filter for use in active sound attenuation[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1987, 35(4):433-437.
- 4 LOVE E K, BEE M A. An experimental test of noise-dependent voice amplitude regulation in cope's grey treefrog, *Hyla chrysoscelis*[J]. *Animal Behaviour*, 2010, 80(3):509-515.
- 5 曹晏飞,滕光辉,余礼根,等.含风机噪声的蛋鸡声音信号去噪方法比较[J].*农业工程学报*,2014,30(2):212-218.
CAO Yanfei, TENG Guanghui, YU Ligen, et al. Comparison of different de-noising methods in vocalization environment of laying hens including fan noise[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(2):212-218. (in Chinese)
- 6 UR M B, NIEZRECKI C. A wavelet packet adaptive filtering algorithm for enhancing manatee vocalizations[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(4):2059-2067.
- 7 BEIRENDONCK S V, THIELEN J V, VERBEKE G, et al. The association between sow and piglet behavior[J]. *Journal of Veterinary Behavior*, 2014, 9:107-113.
- 8 TALLET C, LINHART P, POLICHT R, et al. Encoding of situations in the vocal repertoire of piglets (sus scrofa): a comparison of discrete and graded classifications[J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(8):1-12.
- 9 PUPPE B, SCHON P C, TUCHSCHERER A, et al. Castration-induced vocalisation in domestic piglets, *Sus scrofa*: Complex and specific alterations of the vocal quality[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2005, 95(1-2):67-78.
- 10 AYDIN A, BAHR C, VIAZZI S, et al. A novel method to automatically measure the feed intake of broiler chickens by sound technology[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101(4):17-23.
- 11 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.
- 12 ANDERSEN H M L, DYBKJÆR L, HERSKIN M S. Growing pigs' drinking behaviour; number of visits, duration, water intake and diurnal variation[J]. *Animal*, 2014, 8(11):1881-1888.
- 13 陆明洲,沈明霞,丁永前,等.群养母猪饮水行为自动监测系统设计[J].*南京农业大学学报*,2013,36(5):133-138.
LU Mingzhou, SHEN Mingxia, DING Yongqian, et al. Design of automatic system for drinking behavior monitoring in group housed sows[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(5):133-138. (in Chinese)
- 14 ZHONG Yue, XU Lisheng, YAN Li, et al. Adaptive R-wave detection method in dynamic ECG with heavy EMG artifact[C]//2012 IEEE International Conference on Information and Automation, 2012:83-87.
- 15 曹晏飞,余礼根,滕光辉,等.蛋鸡发声与机械噪声特征提取及分类识别[J].*农业工程学报*,2014,30(18):190-197.
CAO Yanfei, YU Ligen, TENG Guanghui, et al. Feature extraction and classification of laying hens' vocalization and mechanical noise[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014,30(18):190-197. (in Chinese)
- 16 SHAPIRO S S, WELK M. An analysis of variance test for normality [J]. *Biometrika*, 1965, 52(3-4):591-611.
- 17 闫丽,沈明霞,姚文,等.基于 MPU6050 传感器的哺乳期母猪姿态识别方法[J].*农业机械学报*,2015,46(5):279-285.
YAN Li, SHEN Mingxia, YAO Wen, et al. Recognition method of lactating sows' posture based on sensor MPU6050 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):279-285. (in Chinese)
- 18 闫丽,沈明霞,刘龙申,等.基于二次对数能量熵小波包的母猪哺乳声去噪方法研究[J].*农业机械学报*,2015,46(11):330-336.
YAN Li, SHEN Mingxia, LIU Longshen, et al. Denoising method of Log energy entropy quadratic wavelet packet in sows' lactating vocalization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):330-336. (in Chinese)
- 19 BRUNING-FANN C S, KANEENE J B, STEIN A D, et al. Associations between drinking-water nitrate and the productivity and health of farrowing swine[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 1996, 26(1):33-46.
- 20 CORNOU C, VINTHER J, KRISTENSEN A R. Automatic detection of oestrus and health disorders using data from electronic sow feeders[J]. *Livestock Science*, 2008, 118(3):262-271.
- 21 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].*农业机械学报*,2016,47(3):342-348.
XUAN Chuanzhong, WU Pei, ZHANG Li'na, et al. Feature parameters extraction and recognition method of sheep cough sound [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(3):342-348. (in Chinese)