

猪用智能粥料器控制系统研究

乔爱民¹ 何博侠² 王艳春¹

(1. 蚌埠学院电子与电气工程系, 蚌埠 233000; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 设计了一种基于嵌入式微控制器的猪用智能粥料器控制系统, 该控制系统实现了粥料器在连续送料过程中干饲料和水分的重量比例(水料比)按设定值进行动态调节, 饲料日送料量能得到精确控制。通过静态测量方法获取样本数据, 建立饲料出料速度与送料电动机转速间的最小二乘支持向量回归(LS-SVR)模型。在粥料器连续送料过程中, 采用LS-SVR模型融合格罗布斯准则及阈值判断等数据处理方法对实时采样数据的异常值进行剔除, 由最小二乘线性回归预测出固定时间内的干饲料出料量, 在进水量可准确测量的前提下, 实现水料比动态调节。粥料器控制系统通过结合静态测量及LS-SVR回归模型的质量递推补偿方法对粥料器每日的送料量进行质量补偿, 实现了对粥料器日送料量的精确控制。控制系统的水料比动态调节误差在4%以内, 质量递推补偿方法可以保证平均单头猪日进食量误差不超过1 g。

关键词: 粥料器; 控制系统; 水料比; LS-SVR; 格罗布斯准则; 质量递推补偿

中图分类号: TH823; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0166-10

Control System of Smart Pig Porridge Feeder

Qiao Aimin¹ He Boxia² Wang Yanchun¹

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Bengbu University, Bengbu 233000, China)

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The control system of a smart pig porridge feeder was designed based on MCU whose kernel was the ARM Cortex-M3. The control system could well solve the problems of pig porridge feeder which include both the weight proportion between water and dry feeding, and the dry feeding weight delivered for every day. The ways of dynamical adjustment for the weight proportion of water and dry feed were shown as follows. Firstly, the least square support vector regression (LS-SVR) model between the delivered speed of the dry feeding and the motor's rotary speed was founded. Then referred to the LS-SVR model, the abnormal real-time sampling weight value during continuous delivering feed was removed by using some data process methods, such as the threshold value judgment and the Grubbs criterion. At last, the value of feeding at certain times was predicted via the line regression model attained by least squares fitting the rest of sampling data. Because the water flow could be truly detected by a flow sensor, the weight proportion of water and dry feed was well adjusted. Using recursive weight compensation combined the LS-SVR model and static measurement means, the delivered dry feeding weight for one day was accurately controlled by the control system. After being mixed with stirred fully by the feeder using the control system, the water and the dry feed were turned to porridge whose nutrients should be better absorbed by pigs. The weight proportion of water and dry feed error was below 4%. The weight error of feeding for a pig per day was less than 1 g.

Key words: porridge feeder; control system; proportion of water and feed; least square support vector regression; Grubbs criterion; recursive weight compensation

引言

我国的生猪养殖业发展迅猛,自 2007 年以来,生猪养殖规模约占全球总规模的 50% 左右^[1-2]。伴随养殖规模的扩大,我国的生猪饲养水平逐年提高,在较大型饲养场,多采用半自动或自动的饲养设备代替以往繁重的人工喂养方式^[3]。目前的饲养设备,多采用以下 2 种方式送料:①直接将干料投放到料槽中,生猪先吃干料后再到饮水设备处补充水分。②先投放干料,然后在干料上添加一定的水分。无论是第 1 种还是第 2 种送料方式,都存在着如下的问题:由于饲料和水分没有得到充分按比例混合,造成生猪对进食的饲料养分吸收不够充分,尤其对于颗粒料,在和水混合前没有得到充分的研磨搅拌,更不利于生猪对饲料养分的吸收,同时,现有设备不能自动定量给料,没有充分考虑生猪生长过程的进食规律,给料随机性较大,经常造成送料量过多或送料量过少的情况,不符合科学化、效率化的养猪需求。

猪用粥料器是一种可以实现将水分和干饲料按照设定的水料比进行混合搅拌研磨成粥的新型喂养设备,粥的稀稠度由水料比控制,粥的稀稠度对生猪的快速健康成长有着重要影响,同时,符合生猪生长规律的饲料定量控制对喂养质量的提高也很关键。对猪用智能粥料器而言,在其连续送料期间,水料比的动态调节结果直接影响粥的稀稠度,同时,日送料量的精确控制可以保证生猪进食符合成长规律。

支持向量回归(SVR)是一种基于数据的机器学习方法,采用结构风险最小化原则,较好地解决了小样本、非线性、高维数及局部极小点等神经网络回归先天性问题^[4-5]。LS-SVR 是在 SVR 的基础上,把二次优化问题转化为一线性方程组的求解问题,在具有较高拟合精度的情况下,降低了计算复杂性,提高了实现速度^[4-5]。猪用粥料器的干饲料出料由送料电动机带动送料机构实现,受制于干饲料的属性、送料机构的特性等因素,电动机转速和出料量并不严格成线性关系,通过静态测量方法获取样本数据,建立出料速度与送料电动机转速间的 LS-SVR 模型,可保证干饲料出料速度与电动机转速间具有足够的回归精度。本文设计智能粥料器,利用格罗布斯准则及阈值判断等多重数据处理方法剔除粥料器连续送料过程中的异常数据^[6],提高在定时长内饲料出料量最小二乘线性回归的精度,降低水料比动态调节误差;通过结合静态测量的质量递推补偿方法,保证粥料器对日送料量的精确控制。

1 猪用智能粥料器原理与控制方法

1.1 猪用智能粥料器结构与工作原理

粥料器的机械机构和系统结构如图 1、2 所示。猪用粥料器由不锈钢支架、料桶、称量传感器、水流量传感器、送料搅拌机构、干饲料与水的混合搅拌池及控制系统等组成。控制系统的控制核心为 32 位的嵌入式 ARM 控制器,利用 2 只金属应变片式力敏传感器实现对干饲料的高精度称量,采用具有较高分辨率的霍尔型流量传感器对进水量进行测量。

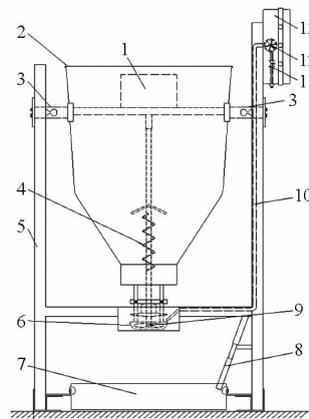


图 1 粥料器机构简图

Fig. 1 Structure diagram of porridge feeder

1. 电动机盒 2. 饲料仓 3. 称量传感器 4. 送料绞龙 5. 外支架
6. 搅拌池 7. 粥料盆 8. 溢出检测探头 9. 螺旋搅刀
10. 输水管 11. 电磁阀 12. 水流量传感器 13. 控制盒

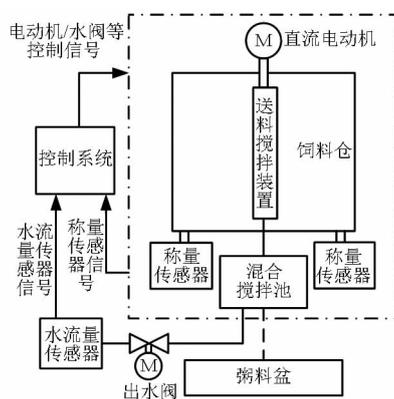


图 2 粥料器系统结构简图

Fig. 2 System structure diagram of porridge feeder

当粥料器需要送料时,控制系统控制送料电动机带动送料搅拌机构首先将干饲料送入混合搅拌池中,同时水阀打开,水和干饲料在搅拌池中按照控制系统设定的水料比进行混合,电动机带动送料搅拌机构最下端的三叶螺旋搅刀对水和干饲料进行研磨搅拌后变成粥料流入粥料盆中,供生猪食用。当送料结束后,电动机停止,水阀关闭。粥料器中的溢出检测探头用于检测粥是否到达预定位置,防止粥料溢出料盆造成浪费。

1.2 水料比的控制精度

水流量采用高分辨率的霍尔型传感器测量,可以保证较高的测量精度,水料比的动态调节精度关键在于干饲料出料量的动态检测精度。粥料器的水料比可根据生猪饲养阶段变化而设置为不同值,以控制粥料的稀稠度。其实际设置范围为 1.0 ~ 3.0,水料比反映了水和干饲料的质量比例,当水料比为 1.0 时,水的质量和干饲料的质量相同,当水料比为 3.0 时,表示水的质量是干饲料质量的 3 倍,水料比可以以 0.1 的变化量递增和递减,要求水料比的控制误差在 5% 以内。在每个送料阶段,需要采用较长时间的连续出料,无法使用静态测量方法对水料比进行调节。由于粥料器送料时称量传感器除受到干饲料的净重作用外,还会受到电动机旋转造成的振动及猪进食过程中的冲击力等因素影响,单纯依靠实时采集到的称量传感器输出数据并不能准确得到连续送料过程中某时段的实际出料量,要实现水料比在粥料器连续送料过程中的准确调节,需要通过合理的数据处理方式方法实现。

1.3 单头猪日平均进食量的精度要求

在单台粥料器喂养生猪头数确定的前提下,粥料器通过控制每日的干饲料送料总量来决定单头猪日平均进食量。表 1 为某猪场提供的单头猪每日进食量数据(第 1 天和第 7 天),以每天 6 个阶段性送料为例,每台粥料器可喂养的幼猪数量为 15 ~ 30 头,要求每天送料总量和表格中要求的误差不超过 20 g,平均到单头猪日进食量误差约 1 g。

表 1 某猪场提供的单头猪日进食量

Tab.1 Pig feeding amount provided by pig farm

喂养天数	喂料阶段	进食量/g	日进食量/g
1	1	18.0	108.0
	2	18.0	
	3	18.0	
	4	18.0	
	5	18.0	
	6	18.0	
7	1	60.0	399.6
	2	62.4	
	3	64.8	
	4	67.2	
	5	69.6	
	6	72.0	

在连续送料过程中,用 ADC 连续采集 100 个点,采样速率设置为 200 次/s,根据采样定理,通过其采样数据可以还原低于 100 Hz 的信号^[7]。干饲料的质量变化理论上为缓变信号,即变化的频率近似为 0 Hz,图 3 为电动机转速为 100 r/min 时实际的

饲料质量采集点分布,图 4 为其经离散傅里叶变换后的幅频谱。

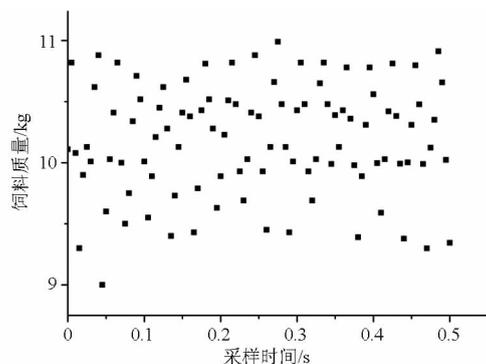


图 3 连续下料时饲料质量采样点分布

Fig.3 Distribution of weight sampling points during continuous delivering feed

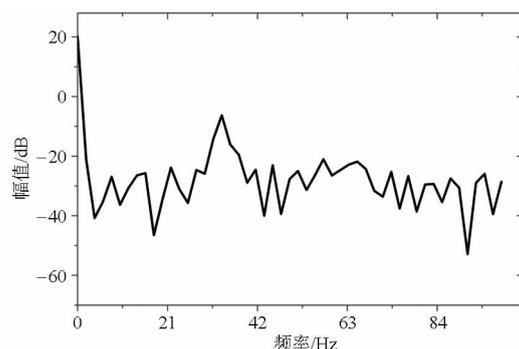


图 4 连续下料时称量传感器输出数据的幅频谱

Fig.4 Magnitude spectrum about weight sensor output data during continuous delivering feed

由图 3 和图 4 可知,在粥料器连续送料时,称量传感器由于受到诸多因素的影响,输出数据的离散性较大,包含了较多的低于 100 Hz 频率成分信号,也就是说,在粥料器连续送料期间,需要采用合理的数据处理方法才能达到粥料器日送料量误差在 1 g 范围内的精度要求。

1.4 水料比及日送料量的控制策略

水料比及单头猪日平均进食量的精度由粥料器的控制系统控制。由于控制系统的核心为嵌入式微控制器,运算及分析等能力相对有限,在粥料器首次投入使用之前,采用静态测量方法通过改变电动机的转速并得到相应的固定时间段内的干饲料出料量样本数据,建立送料速度与电动机转速间 LS-SVR 模型;粥料器正式投入使用后,在连续送料过程中,通过格罗布斯准则、阈值判断及软件低通滤波等多重数据处理方法与 LS-SVR 模型相结合,剔除定时段内异常的实时采样数据;由最小二乘法线性拟合得到该时段内的干饲料送料量,与水流量进行比较运算等处理,实现水料比的动态调节;最后利用生猪间隙性采食的规律,通过静态测量方法融合 LS-SVR 回归模型对每日的总送料量进行递推质量补

偿,实现粥料器日送料量的精确控制。

2 猪用智能粥料器控制系统

2.1 控制系统硬件

2.1.1 控制系统硬件总体结构

图5为猪用智能粥料器的控制器硬件结构框图。粥料器控制系统的控制核心采用基于32位ARM Cortex-M3核的STM32F103RE微控制器,其内部资源丰富^[8],高达72 MHz的主频及大容量高速存储器保证了LS-SVR模型的实现。由AD转换器实现对高精度调理后的称量传感器输出信号进行模拟量到数字量的转换,AD转换器选用高精度24位的 $\Sigma-\sigma$ 型AD7190,其最高转换速度可达到4800次/s^[9]。直流电动机调速通过脉冲宽度调制(PWM)实现。通过较高分辨率的霍尔传感器对水流量进行实时检测,同时配备相关的电路模块如键盘显示器、串行通信、系统时钟及数据存储电路等。数据存储电路可以存储超过30 d的饲养数据,便于查询饲养数据并找出最佳的送料规律。

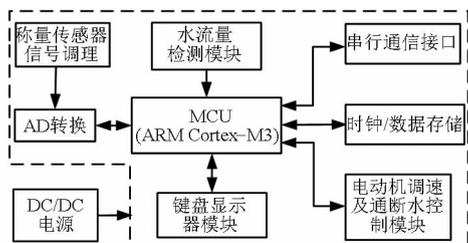


图5 猪用粥料器控制器硬件结构框图

Fig.5 Hardware structure diagram of controller of pig porridge feeder

2.1.2 控制系统主电源电路

控制系统的主电源电路如图6所示。为提高控制系统的抗干扰性能,设计了以单片集成开关芯片DPA425为核心的隔离DC/DC系统主电源。系统电源由24 VDC的电源适配器提供,通过隔离DC/

DC电源电路,实现了控制系统电源与外供电源的电气隔离。其中DPA425可以提供高达300 kHz的开关频率并驱动高频变压器产生2路电源,其中1路为9 V的模拟电源,用于对称量传感器及模拟电路供电,另1路为数字电源,3 VD为3.3 V的数字电路电源,用于对包括STM32F103RE在内的数字电路供电。

2.1.3 高精度质量数据采集电路

高精度质量数据采集电路如图7所示。由于控制系统要求对粥料器日送料量进行精确控制,质量数据采集需要有相应的高精度调理电路。称量传感器的供电电源采用高精度的精密模拟电源5 VA提供,电压参考芯片REF5050提供5 V低噪声的精密5 V参考电压,通过U11和Q2扩流后产生精密5 V模拟电源供给称量传感器及24位的ADC。精密双运放OP2177一方面实现对称量传感器的差动输出信号进行截止频率约为20 Hz的二阶巴特沃兹低通滤波,另一方面对称量传感器的差动输出信号进行2倍的差动放大后送入ADC。ADC的数字电源电压采用3.3 V,便于与ARM微控制器电平匹配,模拟电源采用5 V的精密电源。数字电路电源和模拟电路电源分开走线,数字电源地和模拟电源地在控制系统的主电源处通过0 Ω 电阻连接。

2.1.4 送料电动机调速及水量测控电路

电动机调速及水量测控电路见图8。基于ARM Cortex-M3核的STM32F103RE内部具有精度可达16位的专用PWM定时器,可以产生PWM信号实现对直流电动机的调速。TLP250是专用于MOS管的隔离驱动芯片,驱动IGBT器件15N41,PWM信号由STM32F103RE的专用PWM定时器控制PA7管脚产生。D13为大电流的肖特基二极管用于续流,F1为自恢复保险丝实现对电动机的过流保护。

水流量传感器选用霍尔开关型流量传感器,最

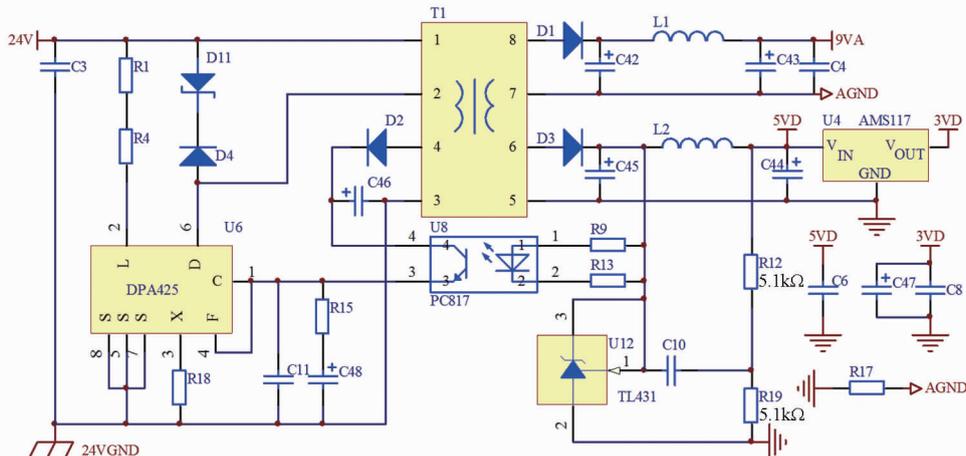


图6 控制系统主电源电路

Fig.6 Main power circuit of control system

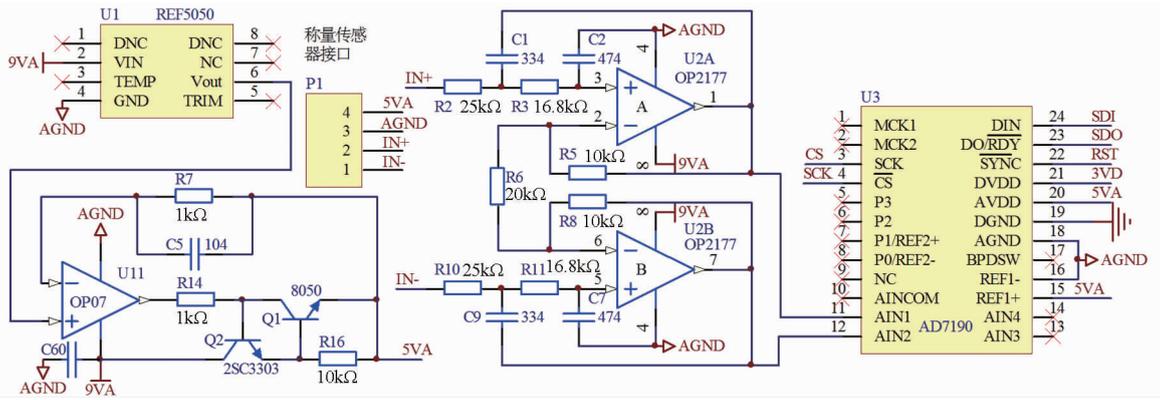


图7 高精度质量数据采集电路

Fig.7 High-precision weight data acquisition circuit

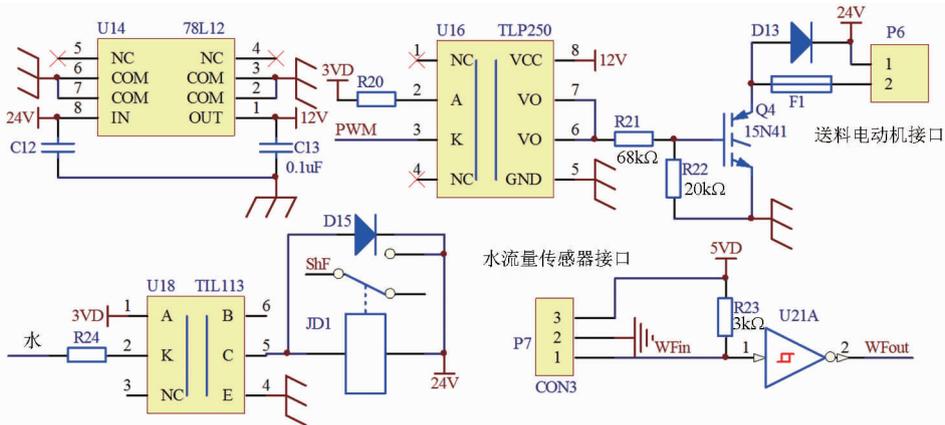


图8 电动机调速及水量测控电路

Fig.8 Circuit of adjustable rotate-speed for motor and water flow measurement

低能分辨 0.5 L/min 的流量。水流量传感器输出的脉冲信号经施密特触发器整形后送 STM32F103RE 内部定时计数器处理。水的通断由达林顿输出的光耦 TIL113 控制继电器 JD1 实现。

2.2 控制系统的软件设计

2.2.1 软件总体流程

控制系统的总体软件流程如图 9 所示。在粥料器首次启动或首次投入使用前,采用静态测量方法,通过改变送料电动机的转速,得到不同送料电动机转速对应的固定时间段内干饲料出料量,并形成样本集,建立送料电动机转速与干饲料出料速度间的 LS - LVR 模型,作为粥料器在连续送料期间水料比动态调节及日送料总量预测依据。当达到送料时间节点后,粥料器控制系统控制水阀打开并启动电动机进行连续送料等操作,并在固定时长内,依据建立的 LS - SVR 模型融合质量数据异常值判断、软件滤波及最小二乘线性回归等数据处理方法,实现水料比在一定精度内的动态调节。当满足连续送料终止条件时,控制系统控制粥料器停止连续送料并进入日送料质量补偿阶段。在日送料质量补偿阶段,利用生猪间隙性采食的规律,通过采取结合静态测量的质量递推方法,粥料器控制系统实现日送料

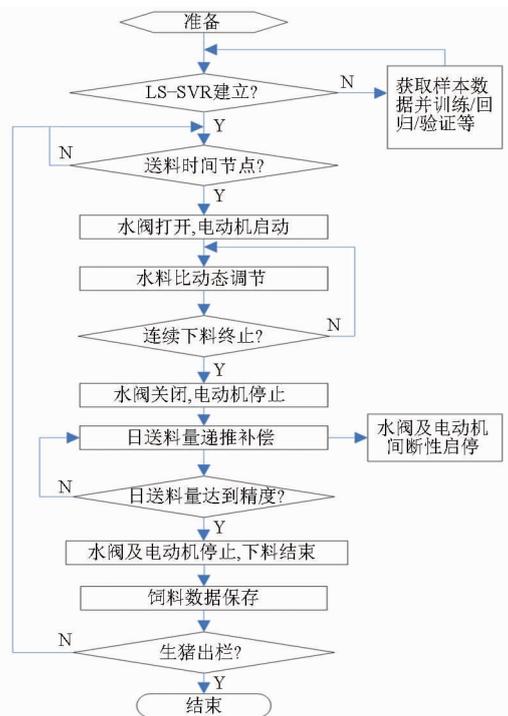


图9 控制系统总体软件流程图

Fig.9 Software flow chart of control system

总量的精确控制。当每天送料结束后,粥料器控制系统将干饲料送料总量、日送料量、单头猪日进食量等相关饲养数据存储于控制系统的存储器中,便于

饲养人员的数据查询。当生猪出栏后,整个饲养周期结束,否则,每当系统时间达到送料时间节点后,重复上述的过程进行送料。

2.2.2 出料速度与电动机转速间的 LS-SVR 模型建立

LS-SVR 是机器学习的一个重要方法,经典的 SVR 算法已经在离散时间序列的预测研究中得到很好的验证,LS-SVR 是在标准的 SVR 基础上,对 SVR 的算法作了某些改进,克服了经典 SVR 算法的训练速度慢等问题^[10-14]。

受制于干饲料的属性、送料机构的特性等因素,电动机转速和出料量并不严格成线性关系,先通过静态测量的方法获得固定时间段 t 内(采用 10 s)的干饲料出料量和送料电动机不同转速间的数值,作为训练样本集 $\{(n_i, y_i)\} (i = 1, 2, \dots, N)$ 。将送料电动机的转速 n_i 作为干饲料出料量与电动机转速间的 LS-SVR 模型输入变量, $n_i \in \mathbf{R}^N$, 通过非线性映射 $\varphi(\cdot)$ 将 N 维样本输入映射到 Hilbert 空间,用 LS-SVR 方法解决如下分类问题。

$$\begin{cases} \min_{\omega, b, \xi} H(\omega, b, \xi) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N \xi_i & (1) \\ \text{s. t. } y_i = \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i \end{cases}$$

式中 ξ_i ——非线性系统模型样本的回归误差

γ ——正则化参数

b ——偏差变量 ω ——权矢量

为将条件约束优化转换为无条件约束优化,引入拉格朗日乘子 a_i , 转换为

$$\begin{aligned} L(\omega, b, \xi, a) &= H(\omega, b, \xi) - \\ &\sum_{i=1}^N a_i (\omega^T \varphi(n_i) + b + \xi_i - y_i) = \\ &\frac{1}{2} \omega^T \omega + \gamma \sum_{i=1}^N \xi_i^2 - \sum_{i=1}^N a_i (\omega^T \varphi(n_i) + b + \xi_i - y_i) \end{aligned} \quad (2)$$

分别对式(2)的变量 ω, b, ξ 及 a 求偏导并令其为 0, 消去 ω, ξ , 得到线性方程组

$$\begin{pmatrix} 0 & \mathbf{E}^T \\ \mathbf{E} & \mathbf{K} + \gamma^{-1} \mathbf{E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{E} = (1, 1, \dots, 1)^T$, $\mathbf{K} = \varphi^T(n_i) \varphi(n_j)$ 为核函数且符合 Mercer 条件, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, 选取径向基核函数

$$K(n, n_i) = \exp\left(-\frac{\|n - n_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

得到粥料器在固定时间段 t 内的电动机转速 n 与出料量间的非线性 LS-SVR 模型

$$y(n) = \sum_{i=1}^N a_i K(n, n_i) + b \quad (5)$$

其中, 正则化参数 γ 和核参数 σ^2 的选取方法采用文献[15]中的混沌粒子群(CPSO)方法, 具体方法见文献[15]。

2.2.3 水料比动态调节方法

水料比的动态调节原理见图 10。在粥料器连续送料期间, 获得在较短时间段内的出料量, 通过和该时间段内的水量进行运算比较得到该时段的预测水料比, 如果水料比与其设定值之间存在误差, 则在下一个时段内控制系统通过调节送料电动机转速改变送料速度, 最终达到水料比和设定值基本吻合。

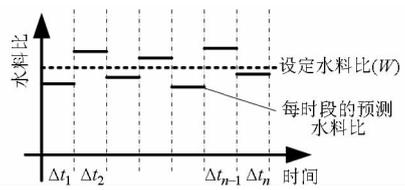


图 10 水料比动态调节示意图

Fig. 10 Diagram of dynamical adjustment for proportion of water and feed

LS-SVR 模型可以在一定的精度范围内预测连续送料过程中 Δt_n 内的出料量, 但固定时间段内的实际出料量不能只按式(5)求得, 因为 LS-SVR 模型的建立过程中, 不可能遍历整个送料时间历程, 尤其当 Δt_n 偏离 LS-SVR 模型建立的固定时间段 t 程度较大时, 单纯依赖式(5)得出的水料比误差更难以保证在其要求范围内。

由图 3 可知, 在连续送料过程中, ADC 转换值呈现出较大的离散性, 但出料量的变化属于缓变信号, 首先对 Δt_n 内的数据进行一阶软件低通滤波, 其算式为

$$y_N = \tau x_N + (1 - \tau) y_{N-1} \quad (6)$$

式中 τ ——软件滤波器的时间常数

x_N ——第 N 次软件滤波器输入

y_N ——第 N 次软件滤波器输出

其次对软件滤波后的数据通过阈值判断方法进行进一步筛选。以 LS-SVR 模型得到的值 $y(n)_N$ 为参考平均值, 将 N 次采样得到的出料量 Δx_N 减去参考平均值并与阈值 ν 进行比较, 其中阈值可根据情况设定。

$$|x_N \Delta t_N - y_N| \leq \nu \quad (7)$$

当满足式(7)时保留该采样点处的数据, 否则予以剔除。

设余下的数据点数为 k , 令各余下的数据相对于 LS-SVR 模型的残差为 $\varepsilon_l, l = 0, 1, \dots, k$, 通过格罗布斯准则进一步对余下的数据进行异常值剔除^[16-17]。

残差均值为

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{l=1}^k \frac{\varepsilon_l}{k} \quad (8)$$

残差标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{l=1}^k \frac{\varepsilon_l^2}{k-1}} \quad (9)$$

并将残差值排序为

$$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_3 \leq \dots \leq \varepsilon_k \quad (10)$$

根据格罗布斯数值表及有效的数值点数 m' ($m' \leq k$), 得到格罗布斯准则鉴别系数 $g(\alpha, m')$, 取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 在保证一定数量的有效数据点数 m 的前提下剔除异常值, 最后对 m 个数值点进行最小二乘一元线性回归^[18], 得到定时间段 Δt_n 内出料量的线性方程式为

$$\Delta M = A + B\Delta t \quad (11)$$

其中

$$A = \frac{\sum_{g=1}^m \Delta t_g \sum_{g=1}^m \Delta t_g \Delta M_g - \sum_{g=1}^m \Delta M_g \sum_{g=1}^m \Delta t_g^2}{\left(\sum_{g=1}^m \Delta t_g\right)^2 - m \sum_{g=1}^m \Delta t_g^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\sum_{g=1}^m \Delta t_g \sum_{g=1}^m \Delta M_g - m \sum_{g=1}^m \Delta t_g \Delta M_g}{\left(\sum_{g=1}^m \Delta t_g\right)^2 - m \sum_{g=1}^m \Delta t_g^2} \quad (13)$$

设 Δt_g 时段内的预测出料量为 ΔM_g , 该时段出水量为 ΔS_g , 从而得到该时段内的预测水料比, 并根据水料比设定值 W , 得到下一个时间段 Δt_{g+1} 内的预计出料量 ΔM_{g+1} , 最后由 LS-SVR 模型推算出 Δt_{g+1} 时段内的送料电动机转速, 如此往复, 从而实现在不同的 Δt 时段内水料比动态调节。这里的 Δt 值不宜过大或过小, 过大时, 水料比的调节精度较低; 过小时, 可能导致在此时段内的有效数据点数较小, 实际工作时, Δt 选择 2~4 s, ADC 的采样速率大约为 40 次/s。

2.2.4 日送料量精确控制

以每台粥料器喂养的幼猪数量为 30 头为例, 每头幼猪日进食量误差不超过 1 g, 即粥料器的日送干饲料总量误差在 30 g 范围内, 对于仅依靠 LS-SVR 模型及连续送料期间的出料量预测难以达到要求。具体方法是: 首先对连续送料过程中的总出料量进行预测, 给定一个误差范围作为终止连续送料的依据, 再结合生猪间隙性进食的规律, 控制系统采用静态测量方法结合质量递推补偿方法实现对日送料总量控制。

假设日送干饲料总量误差为 E_i , 其中 i 代表天数, 单头猪的日进食量总量为 M , 粥料器饲养头数为

d , 时间段 Δt_g 的预测出料量为 ΔM_g , 连续送料的时间段数量为 P , 设定一宽限系数 $\beta, \beta < 1$ 。

(1) 在连续送料期间动态计算每日送料总量设定值与预测的出料总量差值 C_g , 当 C_g 小于 βE_i 时, 终止连续送料, 其中 C_g 的表达式为

$$C_g = dM - \sum_{g=1}^P \Delta M_g \quad (14)$$

(2) 在生猪进食间隙, 停水并停止送料, 判定称量传感器输出稳定性, 当稳定时, 获取阶段性补料初值, 并根据式 (14) 和式 (11) 推导出阶段性补料的时长 Δt_{g+1} , 并获取阶段性补料结束后的稳定值, 得到该次阶段性补料的出料量 ΔM_{g+1} 。

(3) 由式 (14) 计算 C_{g+1} , 判断 C_{g+1} 是否在 E_i 范围内。

(4) 如 C_{g+1} 满足误差要求, 日送干料总量的质量递推补偿结束, 否则重复步骤 (2)、(3)。

日送料总量的精确控制需结合静态测量的方式, 即获取每次阶段性补料的稳定初值和稳定结束值, 需要对称量传感器的输出信号进行稳定判断。稳定判断时送料电动机为停止状态, 水阀关闭, 称量传感器只受饲料等的净重作用。

3 结果分析

3.1 水料比精度分析

设置粥料器的水料比为 2.0, 粥料器的电动机转速 20~150 r/min 可调节, 以静态测量方法得到电动机以不同转速连续送料 3、9、15、30 s 后的 4 组水料比数据, 部分数据见表 2。

表 2 不同连续送料时长的水料比及误差

Tab.2 Proportion of water and feed and its error during various continuous delivering feed times

电动机 转速/ (r·min ⁻¹)	连续送料时长/s							
	3		9		15		30	
	实际 值	误差/ %	实际 值	误差/ %	实际 值	误差/ %	实际 值	误差/ %
20	2.13	6.5	2.08	4.0	2.05	2.5	1.97	-1.5
30	2.12	6.0	1.94	3.0	2.03	1.5	1.96	-2.0
40	2.10	5.0	2.06	3.0	1.97	-1.5	2.03	1.5
60	2.11	5.5	1.95	-2.5	2.02	1.0	1.99	-0.5
90	2.08	4.0	2.05	2.5	2.03	1.5	1.98	-1.0
120	2.07	3.5	1.97	-1.5	2.01	0.5	2.02	1.0

控制系统的实际水料比调节误差见图 11a。由表 2 和图 11a 可知, 通过水料比动态调节方法, 当连续送料时间超过一定时长 (如 9 s) 后, 实际的水料比和其设定值之间误差较小, 一般不超过 4.0%, 连续送料时间越长, 水料比的动态调节效果越好。

图 11b 为未采用水料比动态调节方法, 直接用

LS-SVR 模型对水料比进行调节, 虽有一定的精度, 但由于没有考虑连续送料过程中传感器的实际受力变化, 导致出现水料比调节的精度达不到控制系统精度要求。

图 11c 为水料比动态调节过程中, 没有采用阈值判断对数据进行筛选的水料比动态调节误差分布, 通过软件低通滤波和格罗布斯准则剔除异常值的输出处理方法, 水料比的动态调节误差比图 7 所示的误差要小, 可以控制在 8% 左右, 但由于某些随

机力如冲击力作用于称量传感器导致最小二乘一元回归拟合精度不足。

图 11d 为利用低通滤波和阈值判断准则剔除异常值后的水料比误差, 由于阈值判断的作用, 瞬时的随机作用力如冲击对水料比的调节影响变小, 但是其误差仍不满足系统要求。

综上所述, 粥料器控制系统在合理的硬件设计基础上, 采用 LS-SVR 模型并融合多重数据处理手段可以实现满足系统要求的水料比动态调节。

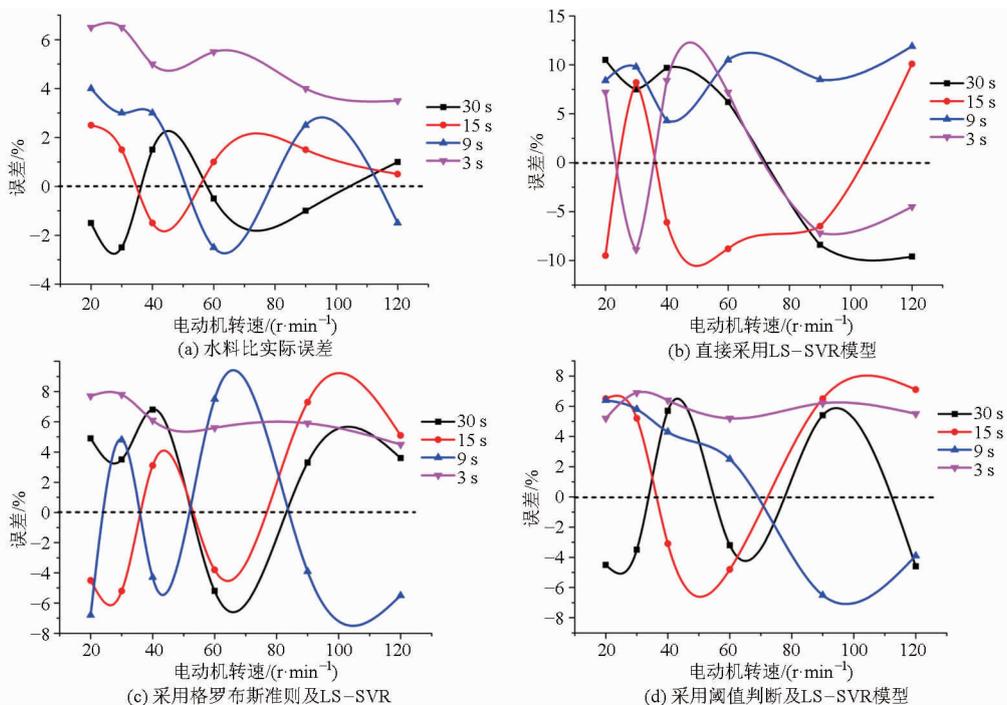


图 11 水料比误差

Fig. 11 Errors of proportion of water and feed

3.2 日送料量精度分析

采用上述控制系统的粥料器在多个猪场进行了试用, 选择其中一台在某猪场连续工作 35 d 的实际数据来分析粥料器实际日送料量精度。图 12 为在某猪场的试用实物图。



图 12 粥料器在某猪场试用实物图

Fig. 12 Diagram of porridge feeder in one pig farm

取 35 d 中的连续 6 d 实际日送干饲料量数据, 该粥料器饲养幼猪数量为 20 头, 数据见表 3。

图 13 为 15 d 内单头猪日喂料误差曲线。

由表 3 和图 13 可知, 采用递推质量补偿方法结合 LS-SVR 模型及动态水料比调节方法得到的每

表 3 某猪场测得的粥料器每日送料量

Tab. 3 Actual feeding amount provided by pig farms g

时间	设定的日送料总量	实际的日送料总量	日总送料误差	单头猪日送料误差
第 4 天	3 600	3 592	-8	-0.40
第 5 天	4 536	4 529	-7	-0.35
第 6 天	6 264	6 254	-10	-0.50
第 7 天	7 992	8 001	9	0.45
第 8 天	9 720	9 706	-14	-0.70
第 9 天	11 448	11 457	9	0.45

日总干饲料送料最大误差控制在 15 g 范围内, 对每台粥料器饲养的猪头数为 15 ~ 30 头来说, 单头猪的日送料量最大误差不超过 1 g。

图 14 为未采用递推质量补偿方法时, 取日送料总量误差 E_i 为 10 g 且喂养头数为 20 头, 改变宽限系数 β 得到模拟 15 d 送料的单头猪日送料平均误差曲线。由图 14 可知, 无论如何改变宽限系数 β , 得到的单头猪日送料量误差都较大。

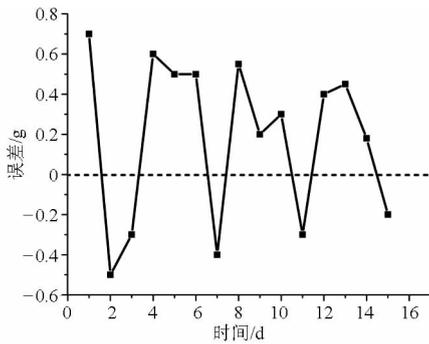


图13 实际的单头猪日送料量误差

Fig. 13 Actual error of one pig feeding amount per day

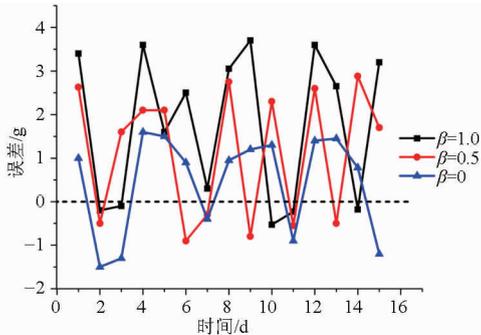


图14 关闭递推质量补偿后单头猪日送料量误差

Fig. 14 Errors of one pig feeding amount per day for feeder after finishing recursive weight compensation

4 结论

(1) 根据猪用粥料器需要对水料比动态调节、

日送料量精确控制、水和饲料充分研磨搅拌等功能要求,设计了满足粥料器性能要求的控制系统。

(2) 通过设计隔离的 DC/DC 系统电源及高精度的称量传感器数据调理电路等,保证了饲料称量的准确性,为实现粥料器控制系统的控制精度提供了必要的硬件基础。

(3) 建立了固定时间段内干饲料出料量与送料电动机转速间 LS-SVR 非线性模型,为粥料器控制系统在水料比动态调节过程中剔除异常数据提供了依据。

(4) 在水流量可较准确测量前提下,在水料比动态调节过程中,控制系统通过对实时数据进行软件低通滤波、阈值判断及格罗布斯准则等数据处理方法,并融合 LS-SVR 模型对异常数据进行剔除,建立了粥料器连续送料期间各时间段干饲料出料量的最小二乘一元线性回归模型,实现了水料比在 4% 误差范围内的动态调节。

(5) 结合静态测量,控制系统采用递推质量补偿方法实现了平均单头猪日进食量误差在 1 g 范围内。

(6) 粥料器在控制系统的控制下,可以实现将干饲料和水分充分混合搅拌成粥,粥料的稠稀度通过设定的水料比调节,每日的干饲料送料量得到精确控制,符合生猪生长过程中的进食规律,通过在一些猪场的试用,饲养效果明显。

参 考 文 献

- LI Ronghua, WANG Jim J, ZHANG Zengqiang, et al. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 362 - 368.
- 朱建春, 李荣华, 张增强, 等. 陕西规模化猪场猪粪与饲料重金属含量研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 98 - 103.
ZHU Jianchun, LI Ronghua, ZHANG Zengqiang, et al. Heavy metal contents in pig manure and feeds under intensive farming and potential hazard on farmlands in Shaanxi Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 98 - 103. (in Chinese)
- 朱军, 麻硕士, 慕厚春, 等. 种猪自动精细饲喂系统设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 174 - 177.
ZHU Jun, MA Shuoshi, MU Houchun, et al. Design of auto-precision feeding system for pigs[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 174 - 177. (in Chinese)
- 相征, 张太镒, 孙建成. 基于最小二乘支持向量机的非线性系统建模[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(9): 2684 - 2687.
XIANG Zheng, ZHANG Taiyi, SUN Jiancheng. Modelling of nonlinear systems based on recurrent least squares support vector machines[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(9): 2684 - 2687. (in Chinese)
- SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Least squares support vector machine classifiers[J]. *Neural Processing Letters*, 1999, 9(3): 293 - 300.
- 张海华, 刘春. 顾及粗差的混合最小二乘平差实验分析[J]. *现代测绘*, 2010, 33(5): 8 - 12.
ZHANG Haihua, LIU Chun. Mixed total least squares and least squares adjustment experimental analysis with gross error considered [J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2010, 33(5): 8 - 12. (in Chinese)
- 贾民平, 张洪亭. 测试技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- ST Microelectronics. STM32F103 serials datasheet[EB/OL]. (2011-03-11) <http://www.STMicroelectronics.com.cn>.
- ANALOG Devices. AD7190 24-bit Sigma-Delta ADC for bridge sensors[EB/OL]. (2011-03-31) <http://www.analog.com>.
- SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Nonlinear modeling and support vector machines [C] // *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2001: 287 - 294.
- 陈雄姿, 于劲松, 唐荻音, 等. 基于贝叶斯 LS-SVR 的锂电池剩余寿命概率性预测[J]. *航空学报*, 2013, 34(9): 2219 - 2228.

- CHEN Xiongzi, YU Jinsong, TANG Diyin, et al. Probabilistic residual life prediction for lithium-ion batteries based on bayesian LS-SVR[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013,34(9):2219-2228. (in Chinese)
- 12 张俊,殷坤龙,王佳佳,等. 基于时间序列与 PSO-SVR 耦合模型白水河滑坡位移预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015,34(2):382-391.
- ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Displacement prediction of baishuihe landslide based on time series and PSO-SVR model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015,34(2):382-391. (in Chinese)
- 13 陈荣,梁昌勇,陆文星,等. 基于季节 SVR-PSO 的旅游客流量预测模型研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2014,34(5):1290-1296.
- CHEN Rong, LIANG Changyong, LU Wenxing, et al. Forecasting tourism flow based on seasonal SVR-PSO model[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2014,34(5):1290-1296. (in Chinese)
- 14 曹龙汉,吴帆,黄剑,等. SVR 优化算法及其在蓄电池容量预测中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009,30(6):1312-1316.
- CAO Longhan, WU Fan, HUANG Jian, et al. SVR optimization and its application to capacity prediction of VRLA batteries[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009,30(6):1312-1316. (in Chinese)
- 15 黄丽,孙玉坤,嵇小辅,等. 基于 CPSO 与 LS-SVM 融合的发酵过程软测量建模[J]. *仪器仪表学报*, 2011,32(9):2066-2070.
- HUANG Li, SUN Yukun, JI Xiaofu, et al. Soft sensor modeling of fermentation process based on the combination of CPSO and LS-SVM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011,32(9):2066-2070. (in Chinese)
- 16 李文敏,王改云. 多传感器数据融合技术在温度检测中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2009(4):103-104.
- LI Wenmin, WANG Gaiyun. Application of multi-sensor data fusion in temperature detection system[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(4):103-104. (in Chinese)
- 17 彭海军,朱敏,鲁照权,等. 电冰箱检测线温度传感器校验平台设计[J]. *合肥工业大学学报*, 2011,34(10):1485-1488.
- PENG Haijun, ZHU Min, LU Zhaoquan, et al. Checking platform design for temperature sensor of refrigerator detection line[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2011,34(10):1485-1488. (in Chinese)
- 18 柏受军,杨元园,王鸣,等. 基于 AD μ C845 的 LVDT 位移传感器非线性补偿[J]. *传感技术学报*, 2013,26(4):541-544.
- BAI Shoujun, YANG Yuanyuan, WANG Ming, et al. Nonlinear compensation of LVDT displacement sensor based on AD μ C845 [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013,26(4):541-544. (in Chinese)