

基于 SVR 的粮仓储粮重量在线检测模型

张德贤^{1,2}, 张 苗^{1,2}, 张庆辉^{1,2}, 张 元², 吕 磊¹

(1. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南郑州 450001;

2. 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南郑州 450001)

摘 要: 粮仓储粮重量自动检测是国家粮食安全的重要保障技术. 本文针对粮堆散粒体特性, 建立了粮仓储粮重量与粮仓底面和侧面压强的数学关系, 证明了基于压力传感器进行粮仓数量在线检测的可行性. 提出了基于内外圈两圈布置的压力传感器布置模型和基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型, 利用内外圈传感器输出值均值的多项式展开构建粮仓储粮重量估计. 针对实仓检测中内外圈传感器输出值均值存在较大波动的问题, 提出了基于 SVR 的粮仓储粮重量检测模型, 给出了 SVR 输入项序列的具体提取方法, 设计了具体的建模算法. 实验表明, 实验粮仓检测模型建模与预测结果的误差小于 $\pm 3\%$, 证明了所提出的粮仓储粮重量检测模型与方法的有效性, 可以满足国家粮仓储粮重量检测的要求.

关键词: 储粮重量监测; 压力传感器; 检测模型; 支持向量回归; 检测精度

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1179-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.024

On-line Granary Storage Weight Detection Based on SVR

ZHANG De-xian^{1,2}, ZHANG Miao^{1,2}, ZHANG Qing-hui^{1,2}, ZHANG Yuan², LÜ Lei¹

(1. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Grain Information Processing and Control, Key Laboratory of Ministry of Education, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Automatic detection of granary storage quantity is an important technology for national food security. In this paper, according to the characteristics of grain peaks, the mathematical relationship between granary storage weight and the bottom / side pressure of granaries is established; the feasibility of the online granary storage quantity detection based on pressure sensors is also demonstrated. Furthermore, a new granary storage weight detection model based on polynomial expansion is proposed by using pressure sensors arranged along the inner and outer rings. The polynomial expansion of the average value of the pressure sensors is used to evaluate the granary storage weight. As the average value fluctuates in practical warehouse detection, a granary storage weight detection model based on SVR is proposed. The detailed extraction method for SVR input sequences is described, and specific modeling algorithm is designed. Practical storage weight detection results show that the detection accuracy of the proposed model is better than 97%, which demonstrates that the proposed granary storage weight detection model is effective and well meet the demand of national granary storage quantity detection.

Key words: grain storage weight monitoring; pressure sensor; detection model; support vector regression (SVR); detection accuracy

1 引言

快速、准确地获得储粮的重量与区域分布是保障国家粮食数量安全的关键技术之一. 目前粮仓储粮重量检测方法主要包括称重法和测量算法^[1,2]. 在大规模

的清查查库中这些方法存在工作量大、成本高等诸多缺点. 亟待开发方便、快捷、准确的在线及网络化国家粮食储藏数量监测技术.

粮仓数量在线检测一般要求检测误差小于 $\pm 3\%$, 连续监测时间大于 3 年, 同时要求检测系统成本低、安

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2017-03-27; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家高科技研究发展计划 (863 计划) (No. 2012AA01608); 国家科技支撑计划 (No. 2013BAD17B04); 国家自然科学基金 (No. U1404617); 粮食信息处理与控制教育部重点实验室开放基金 (No. KFJJ2016102); 河南省高校科技创新团队 (No. 16IRTSTHN026)

装维护简便. 针对这些需求, 本文着重研究基于支持向量回归的粮仓数量在线检测模型和具体建模方法.

2 相关研究工作

近年来, 颗粒物质的静态性质、振动行为、流动特性等研究受到了国内外学者的广泛关注^[3~7]. 在粮仓储粮重量检测领域, 国内外研究学者提出了基于三维激光扫描^[8~13]、电磁波探测^[14~19]、双目立体视觉^[20]等技术的储粮重量检测方法. 由于这些方法在实际应用中的局限性, 基于压力传感器的粮仓重量检测方法逐步受到关注^[21,22].

由于散粮堆底部压力分布的随机性与波动性, 本文将探索基于支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 的粮仓储粮重量检测模型. SVR 模型形式如式 (1) 所示.

$$Z(x) = \sum_{j=1}^l \beta_j K(x, x_j) + b = 0 \quad (1)$$

其中, $K(\cdot, \cdot)$ 为核函数; β_j, b 为通过 SVM 训练所获得的参数, $\beta_j \neq 0$; x_j 为相应的支持向量点, $j = 1, \dots, l$. 核函数一般取为如下式所示径向基函数.

$$K(x_j, x) = \exp(-\gamma \|x - x_j\|^2), \gamma > 0. \quad (2)$$

其中 γ 为大于 0 的参数.

3 粮仓重量与粮仓压强的理论关系

粮仓有平房仓、浅圆仓、筒仓等类型. 粮食入仓后粮堆顶部要求摊平, 在这种条件下, 通过粮堆受力分析可以得出, 粮仓粮堆重量与粮仓压强分布具有下式所示的关系.

$$W = \int_{S_B} Q_B(s) ds + \int_{S_F} f_F(s) Q_F(s) ds \quad (3)$$

其中, W 为粮堆重量; S_B, S_F 分别为粮堆底面和侧面; $Q_B(s), Q_F(s)$ 分别为粮堆底面 S_B 和侧面 S_F 中 s 点的压强; $f_F(s)$ 为粮堆与粮仓侧面之间的摩擦系数. 式 (3) 右边第一项为粮堆底面压力作用项, 第二项为粮堆侧面摩擦力作用项.

基于积分中值定理, 由式 (3) 可以推出

$$W = A_B(\bar{Q}_B(s) + \frac{C_B}{A_B} f_F H \bar{Q}_F(s)) \quad (4)$$

其中 A_B 为粮堆底面面积, C_B 为粮堆底面周长; H 为粮堆高度; $\bar{Q}_B(s)$ 为粮堆底面压强均值, $\bar{Q}_B(s) = \frac{1}{n_B} \sum_{i=0}^{n_B} Q_B(s_i)$, $\bar{Q}_F(s)$ 为粮堆侧面压强均值, $\bar{Q}_F(s) = \frac{1}{n_F} \sum_{j=0}^{n_F} Q_F(s_j)$.

式 (4) 为本文所提出的粮仓重量与粮仓压强的理论关系模型. 可以看出, 对于给定的粮仓和粮食种类, 粮堆与粮仓侧面之间的平均摩擦系数 f_F 为常数, 粮堆重

量与且仅与粮堆底面压强均值 $\bar{Q}_B(s)$ 、侧面压强均值 $\bar{Q}_F(s)$ 以及粮堆高度 H 有关.

4 粮仓粮堆压强分布特征

理论分析与实际实验表明: (1) 对于给定高度的粮堆, 粮堆底面压强均值 $\bar{Q}_B(s)$ 与粮堆侧面压强均值 $\bar{Q}_F(s)$ 会相互转化, $\bar{Q}_F(s)$ 减少会导致 $\bar{Q}_B(s)$ 增大, 反之亦然. 因此需要分别采用不同传感器来检测估计 $\bar{Q}_F(s)$ 和 $\bar{Q}_B(s)$. (2) 粮仓内粮食颗粒有成拱的特性, 粮食颗粒中的力通过不均匀力链传递, 不像固体和液体中的应力会均匀分布^[3~4], 且这种不均匀力链的形成具有随机性, 从而导致粮堆压强不均匀分布的随机性.

5 基于 SVR 的粮仓重量检测模型

5.1 粮仓底面压力传感器布置模型

根据粮仓粮堆的压强分布特性, 本文提出仅在粮仓底面布置内外圈两圈压力传感器来测量粮仓底面和侧面的压力分布 $\bar{Q}_B(s)$ 和 $\bar{Q}_F(s)$, 其布置模型如图 1 所示. 不同类型仓型可采用类似的方式布置. 以通常使用的平房仓和筒仓为例, 压力传感器在粮仓底面按外圈和内圈两圈布置, 每圈随机布置 10~15 个压力传感器. 外圈压力传感器均与侧面墙距离为 d , 内圈传感器均与侧面墙距离为 D . 可取 $d < 1\text{m}$ (在本文研究中取 1m), $D > 2\text{m}$ (在本文研究中取 3m). 为了保证检测模型的通用性, 不同粮仓的 d 和 D 应相同.

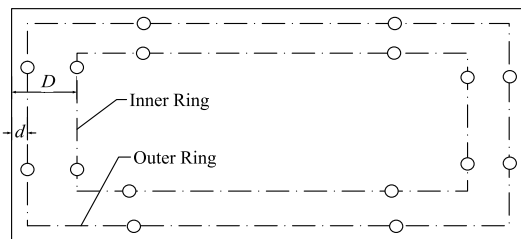


图1 粮仓底面压力传感器布置模型

上述压力传感器布置模型的根本出发点旨在利用外圈传感器输出值均值 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 构建粮仓侧面压强估计, 利用内圈传感器输出值均值 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 构建粮仓底面压强估计, 以有效消除粮仓底面压强分布的不均匀性和随机性的影响, 并有效减少传感器数量.

5.2 基于 SVR 的粮仓重量检测模型推导

由式 (4), 令 $K_c = C_B/A_B$, 则有

$$W = A_B [\bar{Q}_B(s) + K_c f_F H \bar{Q}_F(s)] \quad (5)$$

针对式 (5), 采用 $\bar{Q}_B(s_{Inner}), \bar{Q}_B(s_{Outer})$ 多项式构建 $\bar{Q}_B(s), \bar{Q}_F(s)$ 和 H 的估计为

$$\hat{\bar{Q}}_B(s) = \sum_{m=0}^{N_B} b_B(m) \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \quad (6)$$

$$\hat{H} = \sum_{j=0}^{N_H} b_H(j) \{ [\bar{Q}_B(s_{Inner}) + \bar{Q}_B(s_{Outer})] / 2 \}^j \quad (7)$$

$$f_F \hat{Q}_F(s) = \sum_{n=0}^{N_F} b_F(n) \bar{Q}_B(s_{Outer})^n \quad (8)$$

其中, $b_B(m)$ 、 $b_H(j)$ 、 $b_F(n)$ 分别为 $\bar{Q}_B(s)$ 、 H 和 $\bar{Q}_F(s)$ 估计项的系数, $m = 0, \dots, N_B, j = 0, \dots, N_H, n = 0, \dots, N_F, N_B, N_H, N_F$ 分别为 $\bar{Q}_B(s)$ 、 H 和 $\bar{Q}_F(s)$ 估计的多项式阶数. 将式(6)至式(8)代入式(5), 则有:

$$\begin{aligned} \hat{W} = A_B \{ & \sum_{m=0}^{N_B} b_B(m) \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \\ & + K_c^2 \{ \sum_{j=0}^{N_H} b_H(j) [\bar{Q}_B(s_{Inner}) \\ & + \bar{Q}_B(s_{Outer})] / 2 \}^j [\sum_{n=0}^{N_F} b_F(n) \bar{Q}_B(s_{Outer})^n] \} \quad (9) \end{aligned}$$

整理式(9), 并限制 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 项的最大阶数为 N_B , 限制 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项的最大阶数为 N_F , 可以得出:

$$\begin{aligned} \hat{W} = A_B \{ & \sum_{m=0}^{N_B} a_B(m) \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \\ & + K_c^2 \sum_{n=1}^{N_F} \sum_{m=0}^{N_B} a_F(n, m) \bar{Q}_B(s_{Outer})^n \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \} \quad (10) \end{aligned}$$

其中, $a_B(m)$ 、 $a_F(n, m)$ 为估计项的系数, $m = 0, \dots, N_B, n = 1, \dots, N_F, N_B, N_F$ 分别为 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 、 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 多项式的最大阶数.

式(10)为基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型. 由于粮仓通风作业所引起的振动等因素会引起 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 在一定程度上波动, 从而导致基于式(10)所示检测模型的粮仓重量检测误差也在一定程度上波动. 因此, 下面构建基于 SVR 的粮仓储粮重量检测模型.

在式(10)中, 令

$$\psi(m) = \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \quad (11)$$

$$\varphi(n, m) = K_c \bar{Q}_B(s_{Outer})^n \bar{Q}_B(s_{Inner})^m \quad (12)$$

则有

$$\begin{aligned} \hat{W} = f(\psi(1), \psi(2), \dots, \psi(N_B), \\ \phi(1, 0), \phi(1, 1), \dots, \phi(N_F, N_B)) \quad (13) \end{aligned}$$

对于给定的 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最大阶数 (N_B, N_F) , 式(13)的总项数为 $N_B + N_F(N_B + 1)$. 式(13)表明, 粮仓重量估计 \hat{W} 且仅与 $\psi(m)$ 和 $\varphi(n, m)$ 有关, $m = 0, \dots, N_B, n = 1, \dots, N_F$, 仅是 $\psi(m)$ 和 $\varphi(n, m)$ 的函数. 因此, 可按照 $\psi(1), \psi(2), \dots, \psi(N_B), \varphi(1, 0), \varphi(1, 1), \dots, \varphi(N_F, N_B)$ 的顺序构造一个项序列 Q_{BM} .

$$\begin{aligned} Q_{BM} = (\psi(1), \psi(2), \dots, \psi(N_B^*), \\ \phi(1, 0), \phi(1, 1), \dots, \phi(N_F^*, N_B^*)) \quad (14) \end{aligned}$$

以项序列 Q_{BM} 的 $N_B + N_F(N_B + 1)$ 项作为支持向量机的输入, 以粮仓储粮重量作为支持向量机的输出, 则可构造基于 SVR 的粮仓重量检测模型为如下式所示.

$$\hat{W} = A_B \left(\sum_{j=1}^l \beta_j \exp(-\gamma \|Q_{BM} - Q_{BM}^j\|^2) + b \right) \quad (15)$$

其中, β_j, b, γ 为通过 SVR 训练所获得的参数, $\beta_j \neq 0$;

Q_{BM}^j 为相应的支持向量点, $j = 1, \dots, l, l$ 为支持向量的个数. 图 2 为基于 SVR 的粮仓重量检测模型示意图.

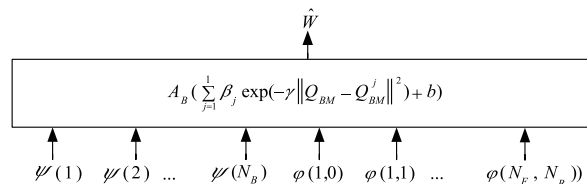


图2 基于SVR的粮仓重量检测模型示意图

式(15)为本文提出的基于 SVR 的粮仓重量检测模型. 从式(15)可以看出, 对于给定的模型参数, 模型的粮仓储粮重量预测值仅取决于 $\|Q_{BM} - Q_{BM}^j\|^2$ 值的大小, $\|Q_{BM} - Q_{BM}^j\|^2$ 为 SVR 输入项序列与支持向量点 Q_{BM}^j 的距离, 支持向量点 Q_{BM}^j 为典型的样本点, 因此这种检测模型具有基于模板的模式识别特征, 具有良好的鲁棒性和预测能力.

5.3 基于 SVR 的检测模型建模及算法

对于任意给定的检测粮仓, 假设对于第 k 次检测, 粮仓储粮重量为 W_k , 根据内外圈压力传感器检测值计算出相应的内外圈压强均值和项序列 $Q_{BM}^k = (\psi(1)_k, \psi(2)_k, \dots, \psi(N_B)_k, \varphi(1, 0)_k, \varphi(1, 1)_k, \dots, \varphi(N_F, N_B)_k)$, 则建模样本集可表示为 $S = \{(Q_{BM}^k, W_k/A_B^k)\}_{k=1}^K$, 其中 A_B^k 为第 k 次检测的粮仓底面面积, K 为样本数, 并将 W_k/A_B^k 取值以及 Q_{BM}^k 的各项值分别规范到 $[-1, 1]$. 将样本集 S 分为三个部分, SVR 模型建模样本集 S_M 、 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最大阶数选择样本集 S_O 以及测试样本集 S_T .

对于式(15), 任意选定一组 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 、 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 多项式的最大阶数 (N_B, N_F) , 则可利用 SVR 模型建模样本 S_M 和支持向量机训练算法获得相应的 SVR 模型. 对于所建立的 SVR 模型和最大阶数选择样本集 S_O , 依据下式所示的百分比误差模型计算最大阶数选择样本集 S_O 和 SVR 模型建模样本集 S_M 的预测误差 $E(N_B, N_F)$.

$$E(N_B, N_F) = \sum_{i \in S_T \cup S_M} \frac{|W_i - \hat{W}_i|}{W_i} \quad (16)$$

其中, \hat{W}_i 为样本点 i 的粮堆重量预测值. 设定 N_B 选择范围 $[1, MaxN_B]$, N_F 选择范围 $[1, MaxN_F]$, 在本项目研究中, 一般取 $MaxN_B$ 和 $MaxN_F$ 为 6 ~ 10. 若

$$E(N_B^*, N_F^*) = \min_{\substack{1 \leq N_B \leq MaxN_B \\ 1 \leq N_F \leq MaxN_F}} E(N_B, N_F) \quad (17)$$

则 (N_B^*, N_F^*) 为 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最佳最大阶数. 上述利用 SVR 模型建模样本集 S_M 、 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最大阶数选择样本集 S_O 进行建模, 通过样本集 S_O 限制模型阶数, 自动调整模型结构.

根据上述, 式(15)所示的基于 SVR 的粮仓重量检

测模型的建模算法及步骤描述如下:

算法 1 粮仓储粮重量检测模型建模算法.

输入:SVR 模型建模样本集 S_M ,

最大阶数 (N_B, N_F) 选择样本集 S_O ,

测试样本集 S_T ,

最大阶数选择限制 $MaxN_B$ 和 $MaxN_F$.

输出:模型最佳最大阶数 N_B^* 和 N_F^* ,SVR 模型参数.

1. 根据设定 N_B 选择范围 $[1, MaxN_B]$, N_F 选择范围 $[1, MaxN_F]$, 按大小顺序抽取一组 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 、 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最大阶数 (N_B, N_F) ;

2. 根据项最大阶数 (N_B, N_F) , 利用 SVR 模型建模样本 S_M 和支持向量机训练算法构建相应的 SVR 模型;

3. 依据式(16)所示的百分比误差模型计算最大阶数选择样本集 S_O 和 SVR 模型建模样本 S_M 的预测误差 $E(N_B, N_F)$;

4. 依据式(17)所示的项最佳最大阶数优化模型优化选择 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最佳最大阶数 (N_B^*, N_F^*) . 若 $N_B < MaxN_B$ 或 $N_F < MaxN_F$, 转 1;

5. 根据最佳最大阶数 (N_B^*, N_F^*) , 利用 SVR 模型建模样本 S_M 和支持向量机训练算法构建相应的 SVR 模型, 并终止.

6 实验与分析

6.1 实验粮仓检测模型建模与预测结果

实验所采用的平房仓的传感器布置如图 3 所示, 实验粮食种类为玉米, 共进行 4 次实验. 以 1~3 次实验为回归样本, 以实验 4 作为项最高阶数选择样本和测试样本. 根据式(13), 取支持向量机训练参数 $C = 10000$, $\gamma = 0.01$, 并采用基于式(10)所示模型和回归算法的最佳最大阶数 (N_B^*, N_F^*) 优化方法, 获得 N_B^* 为 7, N_F^* 为 2, SVR 检测模型训练后获得 17 个支持向量点, 重量预测结果如表 1 至表 4 所示, 4 次实验的平均相对误差为 1.23%.

表 1 实验 1 储粮重量计算结果

粮食重量(T)	预测值(T)	误差(T)	误差百分比(%)
56.7018	57.4392	0.73745	1.30058
86.6046	86.0056	-0.59895	-0.69159
116.196	116.898	0.70206	0.6042
145.061	145.758	0.69732	0.48071
162.4	161.715	-0.68516	-0.42189

表 2 实验 2 储粮重量计算结果

粮食重量(T)	预测值(T)	误差(T)	误差百分比(%)
57	57.7191	0.71907	1.26153
85.5	86.2112	0.71125	0.83187
113.5	114.885	1.38501	1.22027
138.7	139.445	0.74509	0.53719
161.9	162.651	0.75061	0.46363

表 3 实验 3 储粮重量计算结果

粮食重量(T)	预测值(T)	误差(T)	误差百分比(%)
55.7	54.4989	-1.20109	-2.15636
82.4	81.6113	-0.78873	-0.95719
111.6	108.744	-2.85634	-2.55944
137.7	136.212	-1.48766	-1.08036
161.7	160.967	-0.73333	-0.45352

表 4 实验 4 储粮重量计算结果

粮食重量(T)	预测值(T)	误差(T)	误差百分比(%)
59.0868	57.7055	-1.38131	-2.33776
87.9646	86.7124	-1.25217	-1.42349
116.74	113.61	-3.1295	-2.68075
146.027	142.078	-3.94864	-2.70405
161.9	162.713	0.81319	0.50228

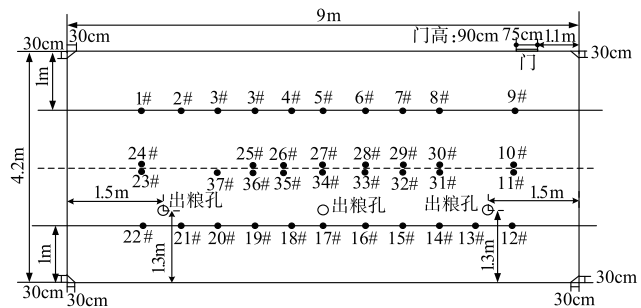


图 3 平房仓压力传感器布置

6.2 实仓检测模型建模与预测结果

对于通州粮库的 5 个粮仓, 储粮种类为玉米和稻谷, 储粮重量分别为 4145 吨、7539 吨、7959 吨、7500 吨和 6351 吨. 经长期在线检测, 获得检测样本 3290 个. 选取 703 个作为建模样本, 其中, 463 个作为 SVR 模型建模样本集 S_M , 240 个作为 $\bar{Q}_B(s_{Inner})$ 和 $\bar{Q}_B(s_{Outer})$ 项最大阶数选择样本 S_O , 其它作为测试样本. 根据式(15), 取支持向量机训练参数 $C = 1000$, $\gamma = 0.5$, 并采用基于式(10)所示模型和回归算法的最佳最大阶数 (N_B^*, N_F^*) 优化方法, 获得最大阶数 N_B^* 为 3, N_F^* 为 4, SVR 检测模型训练后获得 259 个支持向量点, 粮仓储粮重量预测结果如图 4 和图 5 所示, 所有检测点的预测误差均小于 0.4%.

采用类似方法可以建立式(10)所示的基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型, 图 6 和图 7 为所建立模型的预测结果, 所有检测点的预测误差小于 2%. 比较以上两种模型的预测结果可以看出, 基于 SVR 的粮仓重量检测模型具有更高的鲁棒性和检测精度.

7 结论

本文的主要工作具体表现在:

(1) 针对粮堆散粒体特性, 给出了粮仓储粮重量与

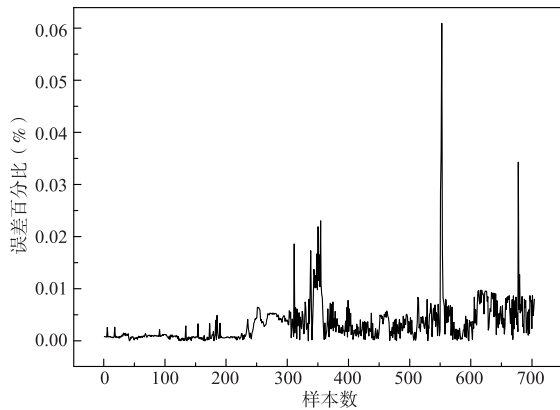


图4 基于SVR的粮仓重量检测模型的建模样本重量预测误差

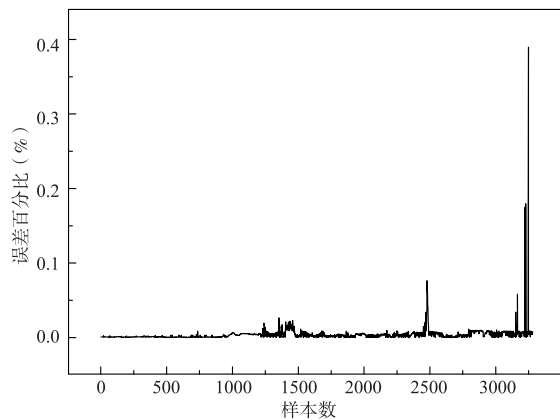


图5 基于SVR的粮仓重量检测模型的所有样本重量预测误差

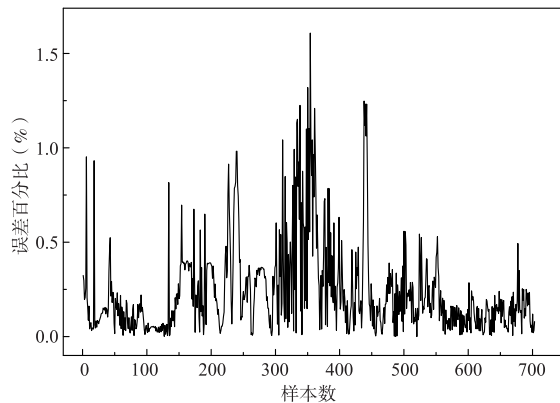


图6 基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型的建模样本重量预测误差

粮仓底面和侧面压强的数学关系,证明了基于压力传感器的粮仓数量在线检测的可行性。

(2)建立了基于内外圈两圈布置的压力传感器布置模型,提出了基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型,并针对实仓检测中内外圈传感器输出值均值存在较大波动的问题,提出了基于SVR的粮仓储粮重量检测模型,给出了SVR输入项序列的具体提取方法,设计了具体的建模算法。

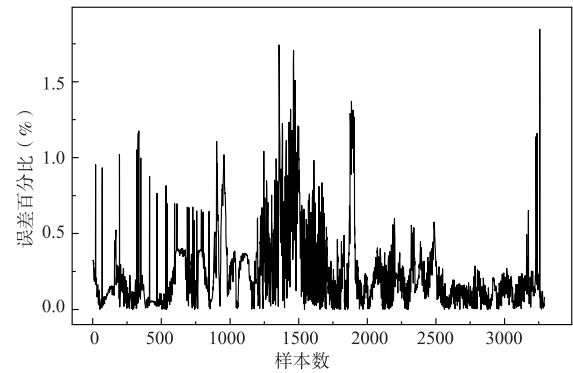


图7 基于多项式展开的粮仓储粮重量检测模型所有样本重量预测误差

(3)实际粮仓重量检测结果表明所提出的粮仓储粮重量检测模型的检测误差远小于 $\pm 3\%$,证明了所提出的模型与方法的有效性。

参考文献

- [1] 任正晓. 粮食库存检查实务[M]. 北京:中国商业出版社,2007.
Ren Zhengxiao. Transaction in the Warehouse Inventory Inspection [M]. Beijing: China Commercial Publishing House,2007. (in Chinese)
- [2] 李凯. 粮仓储粮体积测量中激光点云数据处理技术[D]. 北京:首都师范大学,2011.
Li Kai. The methods of calculating the granary volume applying 3D laser scan technology[D]. Beijing: Capital Normal University,2011. (in Chinese)
- [3] 陆坤权,刘寄星. 颗粒物(上)[J]. 物理,2004,33(9): 629-635.
Lu Kunquan, Liu Jixing. Granular matter (Part I) [J]. Physics. 2004,33(9): 629-635. (in Chinese)
- [4] 陆坤权,刘寄星. 颗粒物(下)[J]. 物理,2004,33(10): 713-721.
Lu Kunquan, Liu Jixing. Granular matter (Part II) [J]. Physics. 2004,33(10):713-721. (in Chinese)
- [5] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2): 22-29.
Ma Zheng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery,2013,44(2):22-29. (in Chinese)
- [6] 王录民,刘永超,许启铿,等. 散粮堆底部压力实测研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2013,34(4):1-4.
Wang Lumin, Liu Yongchao, Xu Qikeng, et al. Research on site measurement of base pressure of bulk grain pile[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013,34(4),1-4. (in Chinese)

- [7] 陈家豪,韩阳,许启铿,等. 高大平房仓散装粮堆底部压力的试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016,37(2):22-25.
Chen Jiahao, Han Yang, Xu Qikeng, et al. The bottom pressure of granular grain pile in large ware house[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016,37(2), 22-25. (in Chinese)
- [8] 戴华阳,廉旭刚,陈炎. 三维激光扫描技术在采动区房屋变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2011,11(35):44-46.
Dai Huayang, Lian Xugang, Chen Yan. Study of the deformation of house induce by mining based on 3D laser scanning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011, 11(35):44-46. (in Chinese)
- [9] Zhang Qingming, Leng Yuanbao, Yang Lei, et al. Research on three-dimensional laser scanning and three-dimensional geological modeling techniques for engineering investigation [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 1149-1153.
- [10] 李鹏. 粮仓储量三维激光扫描快速测量技术研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
Li Peng. Research on rapid measurement technology for grain storage volume based on three dimensional laser scanning [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [11] 董秀军. 三维激光扫描技术获取高精度 DTM 的应用研究[J]. 工程地质学报, 2007,15(3): 428-432.
Dong Xiujun. Research on application of 3D laser scanning technology in acquiring DTM with high accuracy and resolution[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3):428-432. (in Chinese)
- [12] 董秀军,黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(10): 3629-3635.
Dong Xiujun, Huang Runqiu. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(10):3629-3635. (in Chinese)
- [13] Sholts S B, Wärmländer S K T S, Folres L M, et al. Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology[J]. Journal of Forensic Sciences, 2010,55(4):871-876.
- [14] 秦瑶,陈洁,方广有. 粮仓储量信息无损探测技术研究[J]. 中国粮油学报, 2010,2012(4): 51-55.
Qin Yao, Chen Jie, Fang Guangyou. Non-destructive detection of barn reserves information [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010,2012(4): 51-55. (in Chinese)
- [15] 郭文川,吕俊峰,谷文超. 微波频率和温度对食用植物油介电特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009,40(8):124-129.
Guo Wenchuan, Lu Junfeng, Gu Wenchao. Effect of frequency and temperature on microwave dielectric properties of edible vegetable oils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 124-129. (in Chinese)
- [16] 王振宇,刘国华. 走时层析成像的迭代 Tikhonov 正则化反演研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005,39(2): 259-263.
Wang Zhenyu, Liu Guohua. Study of travel time tomography by iterative Tikhonov regularization inversion[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005,39(2):259-263. (in Chinese)
- [17] Samir Trabelsi, Stuart O Nelson. On the accuracy of bulk density and moisture content prediction in wheat from near field free space measurements [J]. Technisches Messen, 2007,74(5):280-289.
- [18] Venkatesh M S, Raghavan G S V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials[J]. Biosystems Engineering, 2004,88(1):1-18.
- [19] 周飞. 仓外探测小麦密度及数量的反演研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2010.
Zhou Fei. Inversion study on the density and quantity of wheat in the outside of the barn [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] 方兴林. 基于双目立体视觉的储备粮数量智能识别算法研究[D]. 重庆交通大学, 2009.
Fang Xinglin. Reserve grain quantity intelligent recognition algorithm research based on binocular stereo vision [D]. Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [21] 张德贤,杨铁军,傅洪亮,等. 粮仓储粮数量在线检测模型[J]. 自动化学报, 2014,40(10):2213-2220.
Zhang Dexian, Yang Tiejun, Fu Hongliang, et al. An online detection model of granary storage quantity [J]. Acta Automatica Sinica. 2014, 40(10). 2213-2220. (in Chinese)
- [22] 张德贤,杨铁军,傅洪亮,等. 基于压力传感器的粮仓储粮数量在线检测方法[J]. 中国粮油学报, 2014,29(4): 98-103.
Zhang Dexian, Yang Tiejun, Fu Hongliang, et al. An online detection method of granary storage quantity based on pressure sensor [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association. 2014,29(4):98-103. (in Chinese)
- [23] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011,40(1):2-10.
Ding Shifei, Qi Bingjuan, Tan Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China. 2011,40(1):2-10. (in Chinese)

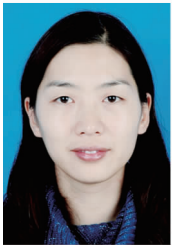
作者简介



张德贤 男,1961 年出生,河南新密人,河南工业大学教授、博导,主要研究方向为智能信息处理、粮食信息技术.
E-mail: zdx@haut. edu. cn



张元 男,1961 年生,河南洛阳人,河南工业大学教授、博导,主要研究方向为电磁波探测、信息融合.
E-mail: zhangyuan@ haut. edu. cn



张苗(通信作者) 女,1979 年出生,河南开封人,博士,河南工业大学副教授,主要研究方向为智能信息处理.
E-mail: zhangmiao7414@ sina. com



吕磊 男,1985 年生,河南鹤壁人,河南工业大学讲师,研究方向为三维测量,3D 打印以及信号处理.
E-mail: ielulei@ 163. com



张庆辉 男,1974 年出生,河南南阳人,河南工业大学教授,主要研究方向为粮食信息处理技术和嵌入式系统应用.
E-mail: zqh131@ 163. com