粮仓储粮数量在线检测模型

张德贤1 杨铁军2 傅洪亮1 樊超1 张元2

摘 要粮仓储粮数量在线检测是国家粮食数量安全的重要保障技术,是粮食库存检查的重要内容.本文根据储粮数量在线 检测精度和可靠性的要求,针对粮仓压强分布的随机性,提出了基于粮仓底面零内摩擦压强估计的粮仓储粮数量检测的新思 路,建立了粮仓压力传感器布置模型,给出了粮堆底面与侧面压力分布随机性消除和侧面摩擦力影响补偿的具体方法,提出了 基于底面压力传感器检测均值的粮仓储粮数量检测模型和快速建模方法.实仓实验结果表明,所提出的储粮数量检测模型检 测误差远小于 3 %,且检测系统成本低,可有效满足国家粮库储粮数量在线实时监测的实际需要.

关键词 储粮数量监测, 压力传感器, 检测模型, 随机性消除, 检测精度

引用格式 张德贤,杨铁军,傅洪亮,樊超,张元.粮仓储粮数量在线检测模型.自动化学报,2014,40(10):2213-2220 **DOI** 10.3724/SP.J.1004.2014.02213

An Online Detection Model of Granary Storage Quantity

ZHANG De-Xian¹ YANG Tie-Jun² FU Hong-Liang¹ FAN Chao¹ ZHANG Yuan²

Abstract Granary storage quantity online detection is a key technology for national food quantity safety, and it is also an important content of grain inventory check. According to the randomness of the granary pressure distribution, a new measurement method based on the estimation of zero internal friction pressure at the bottom of granary is proposed. First, a granary pressure sensor layout model is set up, in which the storage quantity detection accuracy and reliability of the detection system are considered comprehensively. Then, the methods of eliminating the grain heap bottom and side pressure distribution randomness and compensating side friction are presented. The granary storage quantity detection model based on the mean of the bottom pressure sensor values and a fast modeling method are proposed in the end. Experiment results show that the error of the proposed storage quantity detection model is far less than 3 % and that the system cost is low, which can meet the actual need of real-time online monitoring of national grain storage quantity and distribution.

Key words Granary storage quantity monitoring, pressure sensor, detection model, randomness elimination, detection decision

Citation Zhang De-Xian, Yang Tie-Jun, Fu Hong-Liang, Fan Chao, Zhang Yuan. An online detection model of granary storage quantity. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(10): 2213–2220

粮食安全包括数量安全和质量安全,储量数量 检测是粮食库存检查的一项重要内容.现有的粮仓 储粮数量检测方法主要包括称重法和测量计算法^[1],称重法是指用符合法定计量标准的衡器称量粮食重 量的检查方法,其优点是测量结果能够准确反映被 查粮食的实际数量,但是在大规模的清仓查库中效 率低、工作量大、成本高.测量计算法是通过测量计 算粮堆的体积和平均密度计算粮仓中粮食数量的检测方法,实用中存在检测误差大等问题.因此,开发 方便、快捷、准确地在线及网络化国家粮食储藏数 量监测技术,对于保障我国粮食储藏数量安全,提高 粮食宏观调控能力具有十分重大的意义.

近年来,基于三维激光扫描^[2-7]、电磁波探测^[8-12]、双目立体视觉^[13]等技术的储粮数量检测 方法得到了初步研究,但目前这些方法明显存在着 由于检测的间接性而导致的检测精度和可靠性问题. 此外,检测系统的复杂性也导致检测成本高,难以大 规模推广应用.

由于粮食和粮仓数量巨大,粮食价格低,粮仓数 量在线检测一般要求检测误差小于3%,连续监测时 间大于3年,同时要求检测系统成本低、安装维护简 便,因此检测的高精度与检测系统的低成本是粮仓 数量在线检测系统研制必需满足的基本要求.基于

收稿日期 2013-01-15 录用日期 2014-05-02

Manuscript received January 15, 2013; accepted May 2, 2014

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA101008) Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA101008)

opment Program of China (863 Program) (2012AA101008) 本文责任编委 阳春华 Recommended by Associate Editor YANG Chun-Hua

^{1.} 河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001 2. 粮食信息处 理与控制教育部重点实验室 郑州 450001

School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001
Key Laboratory of Grain Information Processing and Control of Ministry of Education, Zhengzhou 450001

上述需求,本文提出了基于压力传感器网络的粮仓 储粮数量检测方法,着重研究了粮仓压强分布特性、 底面压强分布随机性消除、侧面摩擦力影响的补偿、 基于粮食重量误差比的模型参数估计、快速系统标 定等关键问题.

1 粮仓压强分布特性

粮仓有平房仓、浅圆仓、深圆仓等类型,粮食入 仓后,粮堆顶部要求摊平,平房仓粮堆形状大致上为 不同尺寸的立方体,浅圆仓、深圆仓粮堆形状大致上 为不同尺寸的圆柱体.粮仓内的粮堆由无数粮食颗 粒和杂质等堆积而成,粮堆内摩擦大,使其仅具有有 限流动性,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.

$$W = \int_{S_B} Q_B(s) \mathrm{d}s + \int_{S_F} f_F(s) Q_F(s) \mathrm{d}s \qquad (1)$$

其中, W 为粮堆重量; S_B 、 S_F 分别为粮堆底面; $Q_B(s)$ 、 $Q_F(s)$ 分别为粮堆底面 S_B 和侧面 S_F 中的 压强; $f_F(s)$ 为粮堆侧面 S_F 与粮食的摩擦系数.式 (1) 表明, 对于给定的粮仓, 粮仓粮堆重量与且仅与 $Q_B(s)$ 、 $Q_F(s)$ 和 $f_F(s)$ 有关. 它们具有以下特性:

1) 随机性

粮堆中粮食颗粒彼此之间在体积、形状、饱满程度、成熟度、有机成分含量、体积质量、水分、含量、破损情况等诸多方面存在差异,并包含各类杂质.由于粮堆的有限流动性、粮堆成分的复杂性和各成分体积质量的差异,导致入库后的粮堆底面和侧面压强分布 *Q*_B(*s*)、*Q*_F(*s*)以及侧面摩擦系数 *f*_F(*s*) 具有显著的随机性,同时也将影响粮堆与各压力传感器受力面接触程度的一致性,因此势必导致压力传感器输出的随机性.实际测量结果证明了这种随机性.

2) 侧面摩擦力对 *Q_B(s*) 的影响明显 定义

$$Q_{BNF} = \frac{W}{A_B} \tag{2}$$

为粮仓底面零内摩擦压强.其中,W 为粮仓粮堆重量,A_B为粮仓底面面积.

由式 (1), 当粮仓粮堆内摩擦趋于 0 时, 必有 $Q_B(s) \rightarrow Q_{BNF}, \int_{S_F} f_F(s)Q_F(s) ds \rightarrow 0, W \rightarrow Q_{BNF}A_B$. 显然, 粮仓零内摩擦底面压强为粮仓内 摩擦为零时的粮仓底面压强.

在不考虑随机性的情况下,通过力学分析可以 得出,由于粮堆内摩擦和粮仓侧面摩擦力的作用,对 于粮仓底面任意一点 s,必然有 $Q_B(s) \leq Q_{BNF}$,且 两者差别 $Q_{BNF} - Q_B(s)$ 与底面点 s 离侧面距离 D 有关, D 越小两者差别越大.

2 基本检测思想

由前述可知,粮仓压强分布的不均匀性和随机 性是粮仓压强分布的基本特性,直接检测粮堆底面 和侧面的压强分布并基于式 (1) 计算粮堆重量显然 是不经济的和不可行的.针对这个问题,本文提出了 基于粮仓底面零内摩擦压强估计的粮仓储粮数量检 测的新方法.其核心思想就是将式 (1) 所示的粮仓 储粮数量检测转化为粮仓底面零内摩擦压强 Q_{BNF} 的检测与估计.

由式 (2), 本文提出粮仓储粮数量检测模型如下 式所示:

$$\hat{W} = \hat{Q}_{BNF} A_B \tag{3}$$

其中, \hat{W} 为粮堆重量估计值; \hat{Q}_{BNF} 为粮仓底面零 內摩擦压强估计值. 因此, 粮仓储粮数量检测的关键 问题为粮仓零內摩擦压强 Q_{BNF} 的合理估计. 由于 粮仓底面各点的零內摩擦压强 Q_{BNF} 均相同, 因此 可以选择粮仓底面一个点来估计粮仓零內摩擦底面 压强 Q_{BNF} .

对于粮仓和粮仓底面的一个给定点 s, 由于粮仓 底面压强 Q_B(s) 值仅受其邻近粮仓侧面墙的摩擦力 的影响, 而不是受整个侧面摩擦力的影响, 为了准确 衡量侧面摩擦力对底面压强 Q_B(s) 值的影响, 本文 引入单位长度侧面摩擦力的概念. 定义

$$P_F = \frac{F_F}{C_B} \tag{4}$$

为粮仓单位长度侧面摩擦力.其中, F_F 为粮仓侧面 与粮堆的总摩擦力, C_B 为粮仓底面的周长.

对于给定的粮仓、粮食种类和粮仓底面的一个 给定点 s,分析和实验表明, $Q_{BNF} - Q_B(s)$ 大小主 要与点 s 离侧面墙距离 D、粮仓单位长度侧面摩擦 力 P_F 以及点 s 压强 $Q_B(s)$ 的大小有关,因此,本文 提出的侧面摩擦力补偿和粮仓零内摩擦压强 Q_{BNF} 估计模型如下式所示.

$$\hat{Q}_{BNF} = f(\hat{P}_F, D, \hat{Q}_B(s)) \tag{5}$$

其中, \hat{P}_F 为粮仓单位长度侧面摩擦力估计; D 为给 定点与邻近侧面墙的距离; $\hat{Q}_B(s)$ 为给定点 s 的压 强估计.

对于式 (5) 中 \hat{P}_F 和 $\hat{Q}_B(s)$, 由于粮仓单位长度 侧面摩擦力 P_F 和给定点 s 的压强 $Q_B(s)$ 具有随机 性, 在本文研究中, 采用多点均值的方法来消除这些 随机性影响, 并获得 \hat{P}_F 和 $\hat{Q}_B(s)$. 本文所提出的粮仓储粮数量检测方法将粮仓储 粮数量检测转化为粮仓底面零内摩擦压强 Q_{BNF} 的 检测与估计,这种转换可有效减少粮仓类型与大小、 粮食种类等对检测的影响,也同时简化了相关问题 的处理.

3 粮仓储粮数量检测模型建模

3.1 粮仓压力传感器布置模型

由前所述可知, 对于给定的粮仓、粮食种类和粮 仓底面一个给定点 s, 该点压强 $Q_B(s)$ 不仅存在随 机性, 其大小还与其邻近侧面墙距离 D、粮仓单位 长度侧面摩擦力 P_F 有关, 而粮仓单位长度侧面摩擦 力 P_F 的大小取决于其与邻近侧面墙距离 D. 因此, 根据给定点 s 的邻近粮仓侧面墙形状和距离 D, 选 择距离为 D、邻近粮仓侧面墙形状相近的多个底面 点, 则这些点压强受侧面摩擦力影响程度与点 s 基 本相同, 这些点之间压强值的差别将直接反映点的 压强随机性程度. 利用这些点的均值来计算给定点 s的压强 $\hat{Q}_B(s)$, 将会有效消除给定点的压强随机性.

基于这种思路,本文提出的粮仓底面压力传感 器布置模型如图 1 所示,压力传感器沿侧面墙 (尽可 能远离粮仓转角处) 且与墙距离 D 相等布置,不同 仓型可采用类似的方式布置.





Fig. 1 Pressure sensor layout model at the bottom of granary

对于图 1 所示的粮仓底面压力传感器布置,给 定点 s 压强估计 $\hat{Q}_B(s)$ 的计算模型为

$$\hat{Q}_B(s) = \frac{1}{n_B} \sum_i Q_{BM}(D, i) \tag{6}$$

其中, $Q_{BM}(D,i)$ 为第 i 个压力传感器输出值, $i = 1, 2, \cdots, n_B, n_B$ 为底面所布置的压力传感器个数.

为了在保证随机性消除效果的同时,尽可能降低检测系统的成本,在本文的研究中,取式(6)中传感器个数 n_B 为 5~8,与侧面墙距离为 1~2 米,传感器之间的间隔不小于 1 米.

根据粮仓侧面压强的分布特性,为了减少传感 器数量,仅在宽度大的侧面墙上布置两列压力传感 器,具体布置模型如图 2 所示,压力传感器按两列多 行布置,压力传感器行间距均为 h,列间距为 L.







对于图 2 所示的粮仓侧面压力传感器布置,侧面摩擦力可采用逐行计算法估计. 第 *l* 行压力传感器输出的均值 *Q_{FM}(h,l)* 为

$$Q_{FM}(h,l) = \frac{1}{n_c} \sum_{c} Q_{FM}(h,l,c)$$
(7)

其中, $Q_{FM}(h,l,c)$ 为第 l 行第 c 列的压力传感器 输出值, $l = 1, 2, \dots, n_l, n_l$ 为压力传感器行数, $c = 1, 2, \dots, n_c, n_c$ 为压力传感器列数. 则第 l 行的 侧面平均摩擦力估计值为

$$\hat{F}_F(l) = f_F h C_B Q_{FM}(h, l) \tag{8}$$

其中, *f_F* 为粮堆侧面与粮食的平均摩擦系数, *C_B* 为粮仓底面的周长.则粮仓侧面摩擦力估计值为

$$\hat{F}_F = \sum_l \hat{F}_F(l) \tag{9}$$

Ŷ

$$Q_{FSum} = \sum_{l} \sum_{c} Q_{FM}(h, l, c)$$
(10)

由式 (7) 至 (9) 有:

$$\hat{F}_F = \frac{f_F h C_B}{n_c} Q_{F\text{Sum}} \tag{11}$$

由式 (4) 和式 (11), 可得单位长度侧面摩擦力 估计如式 (12) 所示.

$$\hat{P}_F = \frac{f_F h}{n_c} Q_{FSum} \tag{12}$$

对于图 2 所示的粮仓侧面压力传感器布置模型, 对于给定的粮仓与粮食种类,以及给定的侧面压力 传感器行间距 h 和传感器列数 n_c,式 (12) 所示的单 位长度侧面摩擦力估计显然仅与侧面压力传感器输 出值的总和 Q_{FSum} 有关.

侧面压力传感器输出值的总和 Q_{FSum} 本身就 可以消除侧面压强值的随机性.为了在保证随机性 消除和单位长度侧面摩擦力估计效果的同时,尽可 能降低检测系统的成本,在本文的研究中,取式 (12) 中传感器列数为 2,所有压力传感器行间距 h 相同, h 取为 0.5~1.5 米,列间距 L 不小于 1 米,底部压 力传感器距底面为 h/2,顶部压力传感器距粮堆顶 部应大于 1 米.

3.2 基于 $\hat{Q}_{B}(s)$ 和 Q_{FSum} 的储粮数量检测模型

对于图 1 和图 2 所示的粮仓压力传感器布置模型,若设定底面压力传感器个数 n_B 、间距以及与侧面墙距离 D,设定侧面压力传感器行数 n_l 、列数 n_c 、行间距 h、列间距 L,对于粮堆侧面与粮食的平均摩擦系数 f_F 一定的粮堆,由式 (5)、式 (12)和力学分析可以得出,给定点 s 压强估计 $\hat{Q}_B(s)$ 与粮仓零内摩擦底面压强 Q_{BNF} 之差仅与侧面压力传感器输出值的总和 Q_{FSum} 有关,且存在式 (13) 所示的关系.

$$Q_{BNF} - \hat{Q}_B(s) \propto Q_{FSum} \tag{13}$$

图 3 为 $Q_{BNF} - Q_{BM}(D)$ 与 Q_{FSum} 关系的实际测量结果,试验粮仓长 23.2 米,宽 7.3 米,沿着粮仓长的方向布置 1 排压力传感器,压力传感器与侧面墙的距离 D 为 2.1 米. 从图 3 中可以看出, $Q_{BNF} - \hat{Q}_B(s)$ 与 Q_{FSum} 存在明显的线性关系.



图 3 $Q_{BNF} - Q_{BM}(D)$ 与 Q_{FSum} 关系 Fig. 3 The relationship of $Q_{BNF} - Q_{BM}(D)$ and Q_{FSum}

基于上述 $Q_{BNF} - \hat{Q}_B(s)$ 与 Q_{FSum} 关系以及 压力传感器输出与相应实际压强的关系,对于装粮 高度小于 20 米的粮仓,为了简化粮仓储量数量检测 模型,本文提出基于 $\hat{Q}_B(s)$ 和 Q_{FSum} 的粮仓零内摩 擦底面压强 Q_{BNF} 估计模型如式 (14) 所示.

$$\ddot{Q}_{BNF} = a_0 + a_1 \ddot{Q}_B(s) + a_2 Q_{FSum} \tag{14}$$

其中, *a*₀、*a*₁和 *a*₂为待标定参数,反映粮仓压力传感器布置参数、粮堆侧面与粮食的摩擦系数 *f_F*以及压力传感器特性等因素的综合影响.

由式 (3) 和式 (14), 则可得粮仓储粮数量检测 模型为

$$\hat{W} = A_B(a_0 + a_1\hat{Q}_B(s) + a_2Q_{FSum})$$
(15)

其中, \hat{W} 为粮仓储粮数量估计值; A_B 为粮仓底面面积.

对于式 (15) 所示的粮仓储粮数量检测模型,可 以看出:模型通过引入 Q_{BM}(D) 和 Q_{FSum} 的线性 关系,简化了检测模型.模型直接引入侧面压力传感 器输出值的总和 Q_{FSum},适合现有装粮高度小于 20 米的各种粮仓仓型和粮食种类的粮仓储量重量的在 线检测,具有很强的通用性,但需要安装侧面压力传 感器,检测系统成本高.

3.3 基于 Q_{BM}(D) 的储粮数量检测模型

对于给定的粮仓压力传感器布置、粮堆侧面 与粮食的平均摩擦系数以及压力传感器,假设粮 仓储粮数量为 W,相应粮仓的高度为 H,显然有 $\hat{Q}_B(s) \propto H$.同时,由于粮仓侧面摩擦力与侧面平 均压强和粮堆侧面面积的乘积有关,而侧面平均压 强和粮堆侧面面积均正比于 H,故有 $Q_{FSum} \propto H^2$. 因此有

$$Q_{FSum} \propto Q_B(s)^2$$
 (16)

实际实验结果也证明了式 (16) 所示的 Q_{FSum} 与 $\hat{Q}_B(s)$ 的关系, 如图 4 所示. 同时, 从图 4 中可以看 出, Q_{FSum} 与 $\hat{Q}_B(s)^2$ 具有很强的线性关系. 基于这 种关系, 对于装粮高度小于 10 米的粮仓, 本文提出 基于 $\hat{Q}_B(s)^2$ 的粮仓零内摩擦底面压强 Q_{BNF} 估计 模型如式 (17) 所示.

$$\hat{Q}_{BNF} = b_0 + b_1 \hat{Q}_B(s) + b_2 \hat{Q}_B(s)^2$$
(17)

其中, b₀、 b₁ 和 b₂ 为待标定参数.

由式 (3) 和式 (17), 则可得粮仓储粮数量检测 模型为

$$\hat{W} = A_B (b_0 + b_1 \hat{Q}_B(s) + b_2 \hat{Q}_B(s)^2)$$
(18)

对于装粮高度小于 10 米的粮仓,式 (18) 所示的粮 仓储粮数量检测模型通过引入基于 $\hat{Q}_B(s)$ 的 Q_{FSum} 估计,避免了粮堆侧面压强检测,显著减少了所需压 力传感器的个数,有效降低了检测系统的成本.



图 4 Q_{FSum} 与 $\hat{Q}_B(s)$ 的关系 Fig. 4 The relationship of Q_{FSum} and $\hat{Q}_B(s)$

4 检测系统标定

由于式 (15) 和式 (18) 模型中的待标定参数仅 与粮仓压力传感器布置参数、粮堆侧面与粮食的平 均摩擦系数以及压力传感器特性有关,由于粮仓压 力传感器布置参数可选定并保持不变,则对于不同 的传感器、不同的粮食种类、不同的粮仓侧面摩擦 特性,检测系统需要分别标定.下面结合式 (18) 所 示的粮仓储粮数量检测模型来讨论具体的标定方法.

4.1 标定数据采集

对于所选定的标定粮仓,分批逐步进粮并摊平,则可获得若干组粮仓进粮重量 W_c^i 、底面压力传感器输出均值 $(Q_B(s))^i$ 的实验数据,并表示为数据元组 $\langle W_c^i, (Q_B(s))^i \rangle$,其中i为进粮次数,由这些数据构成式(18)模型建模的样本数据.

由于粮仓储量重量一般为数千吨,装粮方式通 常采用沿着粮仓长方形底面的长边,从粮仓一端开 始,装至预定高度并逐步后退.因此如果直接采用分 批进粮并摊平,势必造成每批进粮的称重与摊平工 作量巨大,并且难以采用机械化进粮设备.针对这种 情况,本文提出了一种快速检测系统标定方法,具体 方法如下:

在标定粮仓的一端按照压力传感器布置模型布 置传感器,并利用沙袋建立标定进粮区,如图 5 所 示,其中,沙袋与压力传感器的间距 *d* 为 3 米左右, 沙袋墙高度 1.5~2 米,以减少沙袋墙的不稳定性对 标定进粮区压强分布的影响.

对标定进粮区逐步进粮,每批进粮 0.5 米后摊 平,记录进粮重量和粮仓底面压力传感器输出值,并 根据标定进粮区面积与粮仓总面积的比值,计算相 应高度的整个粮仓进粮重量.这样可获得 3~4 组 实验数据.然后按正常方式装粮,待完成后,记录粮 仓进粮总重量和粮仓底面压力传感器输出值,这样 可获得 4~5 组建模数据.



图 5 标定粮仓进粮区示意图



4.2 待标定系数确定方法

假设标定粮仓底面面积为 A_c ,根据所获得的标 定粮仓实验数据 $\langle W_c^i, (Q_B(s))^i \rangle$, $i = 1, 2, \cdots, n, n$ 为实验数据的组数,利用回归等方法可以获得如下 式所示的模型^[14-15].

$$\hat{W}_c = \beta_0 + \beta_1 Q_B(s) + \beta_2 Q_B(s)^2$$
 (19)

其中, \hat{W}_c 为标定粮仓的重量估计. 比较式 (18) 和式 (19), 可得 $b_0 = \beta_0/A_c$, $b_1 = \beta_1/A_c$, $b_2 = \beta_2/A_c$ 其中, A_c 为标定粮仓底面面积.

对于式 (19) 所示的模型, 常规回归方法的建模 优化目标为粮堆预测误差为最小, 即粮堆实际重量 和预测重量的误差最小, 而粮堆检测则要求粮堆预 测误差与实际重量的误差百分比最小. 因此, 直接采 用常规回归方法的建模优化目标模型, 将导致所建 的模型在粮食重量小时, 预测误差小但误差百分比 会比较大的情况. 针对这个问题, 本文提出了如下 式所示的基于粮食重量误差比的建模优化目标模型, 以降低在粮食重量小时的误差百分比.

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{W_c^i - \hat{W}_c^i}{W_c^i} \right)^2 \tag{20}$$

其中, W_c^i 为第*i*个实验点的粮堆实际重量值, \hat{W}_c^i 为第*i*个实验点的粮堆重量预测值,*n*为建模样本数据的个数.

对于式 (19) 所示的粮堆重量预测模型,式 (20) 可表示为

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{W_{c}^{i} - \beta_{0} - \beta_{1}Q_{B}(s) - \beta_{2}Q_{B}(s)^{2}}{W_{c}^{i}} \right)^{2}$$
(21)

由式 (21), 根据求最小值的方法, 确定模型的待标定参数.

5 检测实验与分析

实验采用的标定粮仓为长 23.2 米、宽 7.3 米小型粮仓,采用的测试粮仓为长 35.143 米、宽 23.2 米的中型粮仓.粮食种类为小麦,实验采用专用电容式压力传感器,精度为 5 %,量程为 100 kPa.根据图 3 所示的粮仓底面压力传感器布置模型,两种粮仓均沿宽度为 23.2 米的侧面墙中部底面均匀布置了 6 个压力传感器,压力传感器与侧面墙的距离 d 均为 2 米,传感器间距为 1.5 米.采用快速标定方法,两种粮仓的实验数据如表 1 和表 2 所示.

	表 1 标定粮仓实验数据	
Table 1	Test results of calibration granar	y

进仓小麦数量	底面压力传感器输出均值
(t)	$Q_{BM}(D)$ (kPa)
65.29	3.82833
128.82	8.36417
204.402	13.62133
649.69	43.176

	表	2	测词	式粮仓	实验	数据	
m 1 1	0	m		1.	C .		

	Table 2	Test	results	of	test	granary
--	---------	------	---------	----	------	---------

进仓小麦数量	底面压力传感器输出均值
(t)	$Q_{BM}(D)$ (kPa)
250.7	2.82967
489.3	6.52383
734.6	10.06217
1019.5	14.178
1253.3	17.698
1514.5	21.01633
2892	40.63117

根据表 1 所示的标定粮仓实验数据,基于式 (18) 所示的粮仓储粮数量检测模型,利用回归方法 所建立的粮仓储粮数量检测模型如式 (22) 所示.

$$\ddot{W} = A_B (0.0705 + 0.08159 Q_{BM}(D) + 0.0001302 Q_{BM}(D)^2)$$
(22)

利用本文提出的新建模方法所建立的粮仓储粮 数量检测模型如式 (23) 所示:

$$W = A_B (0.0719 + 0.08136 Q_{BM}(D) + 0.0001316 Q_{BM}(D)^2)$$
(23)

根据表 2 所示的测试粮仓实验数据,	两种模型
的测试粮仓储粮数量检测结果如表 3 和表。	4 所示.

- 衣う	表 3	:储粮数量检测结果 (回归万法
------	-----	-----------------

Table 3Detection results of storage quantity in test
granary (regression method)

进仓小麦	小麦数量	误差	误差
数量	预测值	(t)	百分比
(t)	(t)		(%)
250.7	245.55965	5.14035	2.0504
489.3	493.92433	-4.62433	0.94509
734.6	734.5182	0.0818	0.01114
1019.5	1017.71126	1.78874	0.17545
1253.3	1262.74977	-9.44977	0.75399
1514.5	1496.14916	18.35084	1.21168
2892	2923.35155	-31.35155	1.08408

表 4 测试粮仓储粮数量检测结果 (新建模方法)

Table 4Detection results of storage quantity in test
granary (modeling method)

进仓小麦 数量	小麦数量 预测值	误差 (t)	误差 百分比
(t)	(t)		(%)
250.7	246.16441	4.53559	1.80917
489.3	493.9587	-4.6587	0.95212
734.6	734.10953	0.49047	0.06677
1019.5	1016.91439	2.58561	0.25362
1253.3	1261.72938	-8.42938	0.67257
1514.5	1495.00962	19.49038	1.28692
2892	2923.32326	-31.32326	1.0831

由表 3 和表 4 可以看出, 基于本文所提出的粮 仓储粮数量检测模型, 利用回归方法所建模型的最 大误差百分比为 2.0504 %. 利用本文提出的新建模 方法的最大误差百分比为 1.80917 %. 新方法所建模 型与常规回归方法所建模型相比, 明显减少了粮食 重量小时的误差百分比. 以上结果表明, 本文所提出 的粮仓储粮数量检测模型的检测误差远小于 3 %, 可 以满足国家粮食检测的要求.

6 结论

本文针对粮仓储量数量在线检测的精度和可靠 性要求,提出了基于粮仓零内摩擦底面压强估计的 粮仓储粮数量检测方法. 在此基础上, 建立了粮仓压 力传感器布置模型, 提出了基于粮仓底面和侧面压 力传感器输出值的粮仓储量数量在线检测模型, 以 及基于底面压力传感器输出均值的粮仓储量数量在 线检测模型, 给出了粮堆底面与侧面压力分布随机 性消除、侧面摩擦力影响的补偿方法. 提出了一种 基于系统标定进粮区的快速系统标定方法, 给出了 基于粮食重量误差比的模型参数估计. 实验结果表 明所提出的粮仓储粮数量检测模型的检测误差远小 于 3%, 证明了所提出的粮仓储粮数量检测模型与方 法的有效性, 可以满足国家粮食数量检测的要求.

References

- Ren Zheng-Xiao. Food Inventory Check Practice. Beijing: China Business Press, 2007. (任正晓. 粮食库存检查实务. 北京: 中国商业出版社, 2007.)
- 2 Wei Xue-Hua, Wang Yong-Guo, Zheng Jun, Wang Meng, Feng Zhong-Ke. Tree crown volume calculation based on 3D laser scanning point clouds data. *Journal of Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 235-240 (韦雪花, 王永国, 郑君, 王萌, 冯仲科. 基于三维激光扫描点云的树 冠体积计算方法. 农业机械学报, 2013, 44(7): 235-240)
- 3 Liu Sheng-Bing, Wei Zong-Kang, Chen Dong-Sheng, Xia Gang. Orientation of target in 3D laser imaging system. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(5): 615-619

(刘生炳,魏宗康,陈东生,夏刚.三维激光成像系统构像点定位方法.中国惯性技术学报,2013,21(5):615-619)

4 Zhang Qing-Ming, Leng Yuan-Bao, Yang Lei, Xu Shuai. Research on three-dimensional laser scanning and threedimensional geological modeling techniques for engineering investigation. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 1149-1153

(张清明,冷元宝,杨磊,徐帅.工程勘察中激光三维扫描和建模技术研究.地球物理学进展,2009,24(3):1149-1153)

5 Li Peng. Research on Rapid Measurement Technology for Grain Storage Volume Based on Three-Dimensional Laser Scanning [Master dissertation], Peking University, China, 2010

(李鹏. 粮仓储量三维激光扫描快速测量技术研究 [硕士学位论文]. 清华大学,中国, 2010)

- 6 Wang Yan-Min, Hu Chun-Mei. A robust registration method for terrestrial LiDAR point clouds and texture and image. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 266-272 (王晏民, 胡春梅. 一种基于地面激光雷达点云与纹理影像稳健配准 方法. 测绘学报, 2012, 41(2): 266-272)
- 7 Sholts S B, Wärmländer S K T S, Flores L M, Miller K W P, Walker P L. Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology. *Journal of Forensic Sciences*, 2010, 55(4): 871–876

- 8 Qin Yao, Chen Jie, Fang Guang-You. Non-destructive detection of barn reserves information. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(4): 51-55 (秦瑶, 陈洁, 方广有. 粮仓储量信息无损探测技术研究. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 51-55)
- 9 Guo Wen-Chuan, Lv Jun-Feng, Gu Wen-Chao. Effect of frequency and temperature on microwave dielectric properties of edible vegetable oils. *Journal of Agricultural Machinery*, 2009, **40**(8): 124–129 (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. 农业机械学报, 2009, **40**(8): 124–129)
- 10 Venkatesh M S, Raghavan G S V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(1): 1–18.
- 11 Qin Yao, Chen Jie, Fang Guang-You, Yin He-Jun. Radar tomography technology to detect reserves of barn. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(1): 66-71 (秦瑶,陈洁,方广有,阴和俊. 雷达层析成像技术对粮仓储量信息的 探测. 电波科学学报, 2010, 25(1): 66-71)
- 12 Lian Fei-Yu. The Research of an Electromagnetic Wave Detection theory and method to Moisture of Grain Pile [Ph. D. dissertation], Shanghai University, China, 2012 (廉飞宇. 大型平房仓储粮水分分布的电磁波检测理论与方法研究 [博士学位论文], 上海大学, 中国, 2012)
- 13 Fang Xing-Lin. Reserve Grain Quantity Intelligent Recognition Algorithm Research Based on Binocular Stereo Vision [Master dissertation], Chongqing Jiaotong University, China, 2009 (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 [硕士 学位论文], 重庆交通大学, 中国, 2009)
- 14 Xi Yu-Geng, Li De-Wei, Lin Shu. Model predictive controlstatus and challenges. Acta Automatica Sinica, 2012, 39(3): 222-236 (席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制—现状与挑战. 自动化学报, 2012, 39(3): 222-236)
- 15 Zhi Yong-Feng, Li Hu-Xiong, Li Ru. Statistical analysis of affine projection using regressive estimated error algorithm. Acta Automatica Sinica, 2013, **39**(3): 240-250 (智永锋,李虎雄,李茹. 一种基于回归估计误差仿射投影算法的统计特性分析. 自动化学报, 2013, **39**(3): 240-250)



张德贤 河南工业大学信息科学与工程 学院教授. 1995 年获得华中科技大学工 学博士学位. 主要研究方向为智能信息 处理,粮食信息技术. 本文通信作者. E-mail: zdx@haut.edu.cn

(**ZHANG De-Xian** Professor at the School of Information Science and

Engineering, Henan University of Technology. He received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1995. His research interest covers intelligent information processing and grain information technology. Corresponding author of this paper.)



杨铁军 河南工业大学粮食信息处理与 控制教育部重点实验室教授. 2003 年获 得电子科技大学工学博士学位. 主要研 究方向信号处理, 信息预测与建模. E-mail: tjyang@haut.edu.cn

(YANG Tie-Jun Professor at the Key Laboratory of Grain Information

Processing and Control (Ministry of Education), Henan University of Technology. He received his Ph.D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2003. His research interest covers signal processing, information prediction and modeling.)



樊超 河南工业大学信息科学与工程
学院副教授. 2008 年获得中国科学院西
安光学精密机械研究所工学博士学位.
主要研究方向为光电检测,图像处理.
E-mail: fanchao@haut.edu.cn

(FAN Chao Associate professor at the School of Information Science and

Engineering, Henan University of Technology. He received Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2008. His research interest covers photoelectric detection and image processing.)



傅洪亮 河南工业大学信息科学与工程 学院教授. 2006 年获得南京邮电大学工 学博士学位. 主要研究方向为无线通信, 压缩感知.

E-mail: jackfu_zz@163.com

(FU Hong-Liang Professor at the School of Information Science and En-

gineering, Henan University of Technology. He received his Ph.D. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2006. His research interest covers wireless communication and compressed sensing.)



张 元 河南工业大学粮食信息处理与 控制教育部重点实验室教授.1996 年获 得南京理工大学工学博士学位.主要研 究方向为电磁波探测,信息融合. E-mail: zhangyuan@haut.edu.cn

(ZHANG Yuan Professor at the Key Laboratory of Grain Information

Processing and Control (Ministry of Education), Henan University of Technology. He received his Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1996. His research interest covers electromagnetic wave detection technology and information fusion.)