

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之六/“新技术”分栏文章之二

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.006

许启铿, 周晓军, 吴强, 等. 便携式粮食库存数量检测设备研发及应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 41-46.

XU Q K, ZHOU X J, WU Q, et al. Research and application of portable grain inventory measurement equipment[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 41-46.

便携式粮食库存数量检测设备研发及应用

许启铿¹, 周晓军², 吴强¹, 袁庆利³, 刘永超⁴, 吴文福⁵, 周志耀⁴

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南郑州兴隆国家粮食和物资储备库有限公司, 河南 郑州 450052;

3. 郑州工大粮安科技有限公司, 河南 郑州 450001;

4. 河南工大设计研究院, 河南 郑州 450001;

5. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为提升粮食库存数量大清查的信息化与智能化技术水平, 综合应用光电检测、集成电路、软件开发、数学建模等技术进行了便携式粮食库存数量检测设备的研发。在功能需求分析的基础上制定了设备研发的总体技术路线, 重点阐述了高精度测量设备及集成控制程序、自适应粮堆体积测量方案及算法、粮堆平均密度算法、管理软件等关键问题及其解决方案, 简要介绍了设备的应用情况。该设备为粮食库存数量检查提供了全新的技术手段。

关键词: 便携式; 粮食数量; 检测设备; 清仓查库; 粮堆平均密度

中图分类号: S-03; TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0041-06

网络首发时间: 2023-03-09 16:22:36

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.0944.004.html>

Research and Application of Portable Grain Inventory Measurement Equipment

XU Qi-keng¹, ZHOU Xiao-jun², WU Qiang¹, YUAN Qing-li³,
LIU Yong-chao⁴, WU Wen-fu⁵, ZHOU Zhi-yao⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology,

Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Henan Zhengzhou Xinglong National Grain and Material

Reserve Co., LTD, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Zhengzhou Gongda Grain Security

Technology Co., LTD, Zhengzhou, Henan 450001, China; 4. Henan University of Technology Design and

Research Academy, Zhengzhou, Henan 450001, China; 5. College of Biological and Agricultural

Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: In order to improve the information and intelligent technology level of the national policy grain inventory, the portable grain inventory measurement equipment was developed by comprehensive application of modern technologies such as photoelectric detection, integrated circuit, software development, and

收稿日期: 2023-01-06

作者简介: 许启铿, 男, 1981年出生, 博士, 高级实验师, 研究方向为储仓结构及仓储智能化。E-mail: xuqikeng@haut.edu.cn.

mathematical modeling. On the basis of functional requirement analysis, the overall technical route of equipment research and development is formulated. The key problems and solutions such as high-precision measuring equipment and integrated control program, adaptive grain pile volume measurement scheme and algorithm and management software are focused. The application of equipment is briefly introduced. The equipment is advanced in technology, easy to carry, rich in functions and easy to operate. It provides a new measuring technology for the national grain clearance check.

Key words: portable; grain quantity; checkout equipment; inventory check; average density of grain pile

粮食是关系国计民生的重要战略物资。为了保证粮食安全，国家建立了粮食储备制度，为稳定粮食市场、宏观调控、应急供应等起到了重要作用。为确保国家粮食数量真实，全面掌握政策性粮食库存情况，每年各级粮食主管部门均需开展全国政策性粮食库存数量和质量大清查工作^[1]。

粮食库存数量检测是大清查的重要内容，目前检测方式仍然是人工测距丈量、计算，并填写粮食实物检查底稿、统计汇总等手工操作方法实现(如图 1 和图 2)。这一检测方法存在以下不足：一是检测方法手段落后、效率低，导致历时长，花费大等问题；二是采用人工测量粮堆尺寸和人为确定粮堆平均密度修正系数的做法，由于检测人员个体之间存在差异，难免存在人为因素影响，很难保证测量、计算结果的客观性；三是当前粮堆体积的测量主要是以装粮线为基准，或只选取少量测点进行钻探获取粮堆高度，难以保证检测精度；四是粮堆平均密度修正系数仍为经验系数，缺乏科学的定量关系，影响粮食库存数量的计算结果；此外，后期数据汇总全部靠手工操作，工作量大、时间滞后，不适应粮食信息化的新形势要求。



图 1 人工丈量仓房尺寸
Fig.1 Manual measuring warehouse size



图 2 人工探杆测量粮堆高度
Fig.2 Manual measuring the height of grain pile

针对全国政策性粮食库存数量大清查涉及面广、工作量大的特点，从粮食行业库存监管实际需要出发，急需创新检测的方法和设备，不断取代完全依赖于人工操作的落后局面，实现自动测量、计算，自动汇总统计和上传，提高粮食数量清查的效率和信息化水平。因此，开发一套便携式粮食库存检查设备十分必要。

1 原理与技术路线

在分析现行粮食库存数量检测方法不足的基础上，考虑技术的先进性、使用的便携性和行业的可推广性等粮食仓储信息化监管的新需求，确定先进性、小型化、便携式、系统化的技术方案，开展便携式粮食库存数量检测设备研发。

采用文献推荐的测量算法^[2]获得粮食库存数量，基于激光测距技术，利用自主研发的高精度三维转动测量机构，自动测量粮仓的长度和宽度，形成自适应的测量方案，对粮堆表面进行网格化扫描，获得粮堆表面的形貌信息，取代传统的人工激光单点测量的落后局面，实现仓内粮堆体积的自动准确测量；根据粮堆的力学分布规律，建立与品种、仓型、粮面高度、存储时间、通风次数等参数相关的仓内粮堆平均密度模型，由该

模型自动计算粮堆平均密度，再结合粮堆测量体积计算粮食库存数量；单仓粮食数量测量完成后，系统可以自动记录数据、存储并自动生成粮食实

物检查工作表、库存粮食储存汇总表、粮油库存数量清查表、库存粮食数量汇总表，并上传上级粮食管理平台。研发的总体技术路线如图 3 所示。

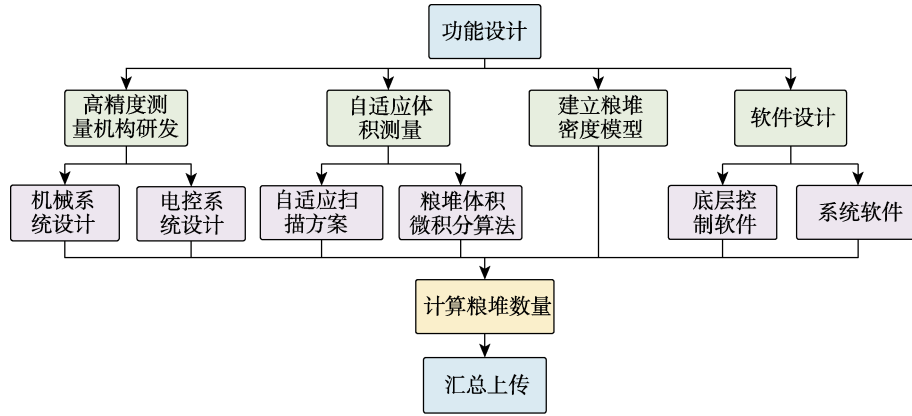


图 3 总体技术路线图

Fig.3 Overall technology roadmap

2 关键技术问题

2.1 高精度三维测量机构研发

采用面测量的三维激光扫描技术^[3-4]，以快速获取粮堆形貌的三维坐标数据为目标，利用内置的高精度三维转动平台，设计测量机构实现水平面内和垂直面内的三维转动，搭载高精度长距离的激光雷达，并集成开发测控控制器，形成高精度三维测量机构，如图 4 所示。



图 4 测量机构外观图

Fig.4 Photo of measuring device

为了保证测量精度，利用大空间场所进行测量机构误差来源的实验及分析，确定了原始数据精度、机构水平度、垂直度、转动中心机械零点等各项误差来源；通过对比基准水平面、随机斜面实验结果，形成了标准操作规程，水平、垂直校准方法。同时，根据便携式现场测试需求，测量机构另外配置的视频检查记录仪，能够对检查的全过程

进行录像并存储，保证检查的客观性和可追溯性。

2.2 高集成度控制器开发

为解决设备便携性需求，采用集成度高和重量较轻的控制电路，以及高能量密度的锂离子电池电源供电；测量机构采用单片机为控制核心，硬件结构框图如图 5 所示，以两台步进电机作为驱动实现精密转台完成水平 360 度、垂直 180 度高精度转动；联动激光雷达测控程序，实现转动和测量动作的高精度测控和数据采集及传输。

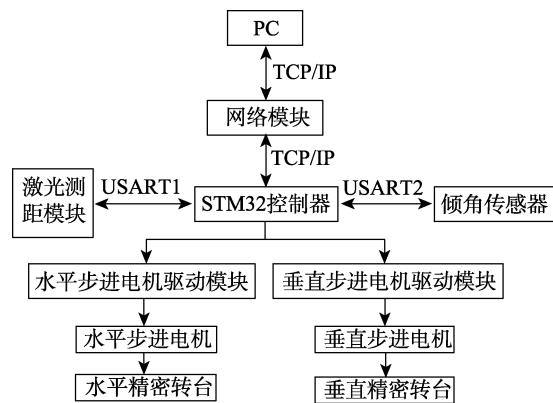


图 5 系统硬件结构框图

Fig.5 Structure block diagram of system hardware

2.3 仓房边界自动测量方法

仓房边界的自动获取，是便携式库存数量检测设备对粮堆形貌扫描测量和粮堆体积计算的重要依据。以下以平房仓和筒仓为例，介绍检测设

备自动测量仓房边界的技术路径。

2.3.1 平房仓

检测设备安置调平后,可以自动测量设备中心至平房仓 4 个墙面的垂直距离,如图 6 所示,测得的 4 个断面两两对应,分别相加即为平房仓的长度和宽度,从而确定平房仓边界。

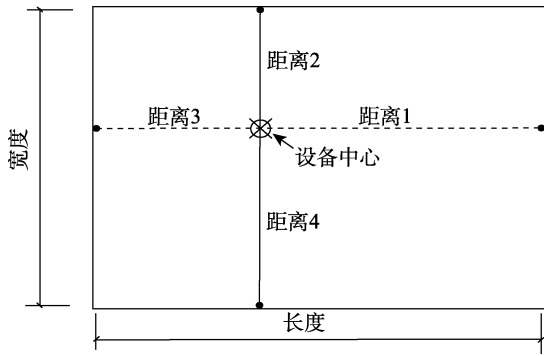


图 6 平房仓边界测量示意图

Fig.6 Measurement diagram of bungalow boundary

2.3.2 筒仓

如图 7 所示,检测设备安置调平后,可以测量水平角度为 0° 、 90° 、 180° 设备中心到筒仓仓壁的垂直距离,以设备中心为坐标原点建立平面直角坐标系,再根据 3 个距离确定仓壁上 3 个测点的坐标。若 3 个测点不共线,即可以确定一个圆,并计算出该圆的直径即为筒仓直径,从而确定筒仓边界,具体计算方法如下。

已知圆上 3 个点的坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ,则该圆半径和圆心坐标的计算公式如下:

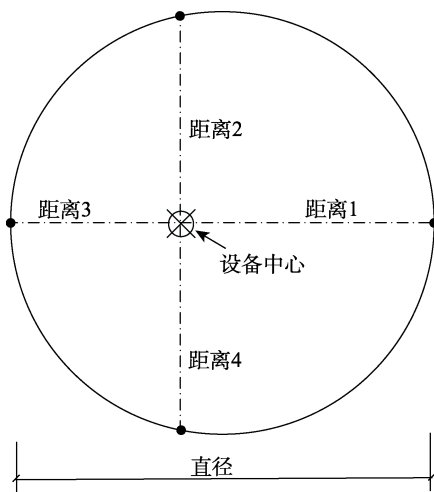


图 7 筒仓边界测量示意图

Fig.7 Measurement diagram of silo boundary

$$A = x_1(y_2 - y_3) - y_1(x_2 - x_3) + x_2y_3 - x_3y_2 \quad (1)$$

$$B = (x_1^2 + y_1^2)(y_3 - y_2) + (x_2^2 + y_2^2)(y_1 - y_3) + (x_3^2 + y_3^2)(y_2 - y_1) \quad (2)$$

$$C = (x_1^2 + y_1^2)(x_2 - x_3) + (x_2^2 + y_2^2)(x_3 - x_1) + (x_3^2 + y_3^2)(x_1 - x_2) \quad (3)$$

$$D = (x_1^2 + y_1^2)(x_3y_2 - x_2y_3) + (x_2^2 + y_2^2)(x_1y_3 - x_3y_1) + (x_3^2 + y_3^2)(x_2y_1 - x_1y_2) \quad (4)$$

$$x = \frac{(x_1^2 + y_1^2)(y_2 - y_3) + (x_2^2 + y_2^2)(y_3 - y_1) + (x_3^2 + y_3^2)(y_1 - y_2)}{2(x_1(y_2 - y_3) - y_1(x_2 - x_3) + x_2y_3 - x_3y_2)}$$

$$= -\frac{B}{2A} \quad (5)$$

$$y = \frac{(x_1^2 + y_1^2)(x_3 - x_2) + (x_2^2 + y_2^2)(x_1 - x_3) + (x_3^2 + y_3^2)(x_2 - x_1)}{2(x_1(y_2 - y_3) - y_1(x_2 - x_3) + x_2y_3 - x_3y_2)}$$

$$= -\frac{C}{2A} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} = \sqrt{\frac{B^2 + C^2 - 4AD}{4A^2}} \quad (7)$$

上式中, A, B, C, D 为由 3 点坐标确定的常数, (x, y) 为圆心坐标, r 为求得的圆半径。

2.4 自适应粮堆测量方法

考虑平房仓、浅圆仓、立筒仓、楼房仓、罩棚仓和千斤囤等多仓型,以及粮堆内含的减压管、单排或多排柱子等复杂情况,在测量机构自动测得的仓房尺寸、测量机构的位置和高度的基础上,利用内置算法程序,自动生成设备的体积扫描测量方法,如图 8 所示。该方法将粮面均匀划分成若干网格,可根据粮面的平整状态,自动加密或减少测量点数;能够自动识别粮堆边界,避免扫描点在粮面以外;能够对粮仓边角自动补点,提高测点效率,实现粮堆表面的高精度自动扫描。

2.5 粮堆体积高精度算法

根据仓房尺寸、粮食摩擦角和休止角等粮食自身特性^[5-6],建立原始测量数据过滤处理准则,有效判断地面点、墙面点、粮面点、突变误差点和边界点,剔除异常数据。基于粮堆表面的有效测点数据,采用微积分思想建立粮堆体积算法。应用 Delaunay 三角剖分方法将粮堆表面测点三

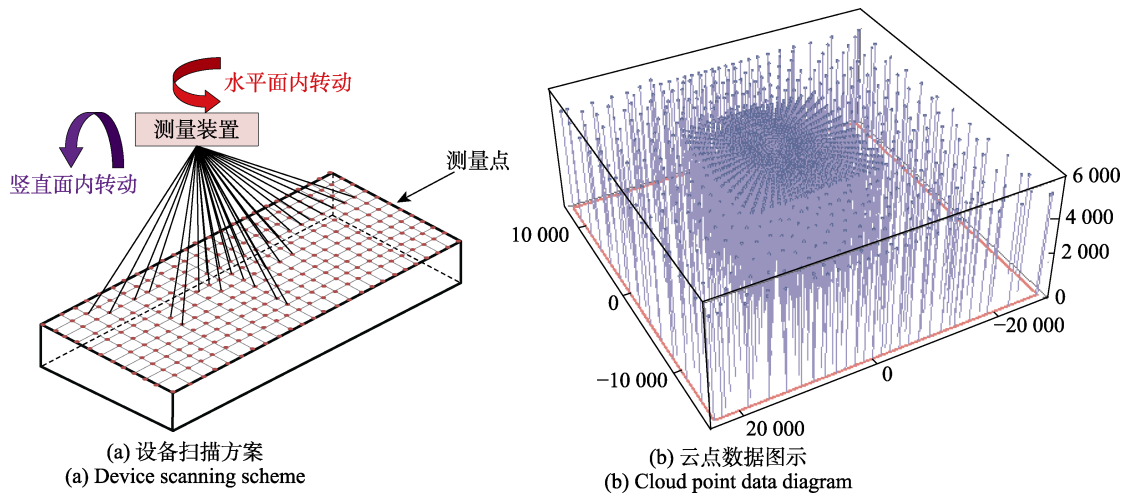


图 8 粮堆测量扫描方案示意图

Fig.8 Scheme diagram of grain pile measurement and scanning

角形网格化(图 9(a)), 每一个三角形网格往粮堆底部(仓房地面)进行投影, 然后将上、下两个三角形对应的角点依次相连, 形成一个三棱柱作为计算单元体(图 9(b)); 每一个单元体的底面积乘以上顶面 3 个角点的平均高度即为该单元体的体积, 所有单元体的体积之和即为粮堆的总体积。

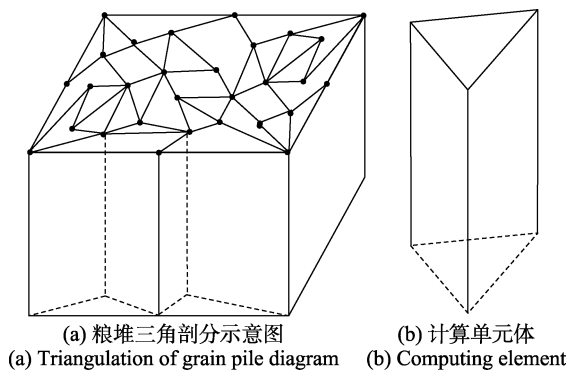


图 9 三角剖分体积算法示意图

Fig.9 Triangulation volume algorithm diagram

2.6 粮堆平均密度取值问题

根据前期在粮堆随时间变化的关系、粮堆高度与粮堆平均密度变化关系、通风、是否人工入仓、是否临近震动源等方面的研究基础^[7-8], 通过大量的实仓数据分析, 经反复比较、筛选与优化, 建立适用于便携式检测的散粮堆平均密度数学模型, 经过现场实仓应用, 测量结果误差小于 2.0%, 验证了模型的适用性和可靠性。

2.7 管理软件开发

进行便携式粮食库存数量检测设备的管理软

件开发, 主要功能包括数据管理、测量管理、报表输出、数据上传等 4 个部分, 软件界面如图 10 所示, 详细功能描述如下。

2.7.1 数据管理

可导入企业、库点、仓房、存储等信息, 并显示已导入的信息数据。

2.7.2 测量管理

通过测量获取仓房边界数据, 获得设备中心距粮底、粮面的距离等信息, 自动生成对应的扫描方案并写入设备程序, 运行并获取粮食数量等数据。

2.7.3 报表输出

获取单一仓房和库点的测量数据, 生产粮食实物检查工作表、粮油库存数量清查表、库存粮食储存(收获)年限情况汇总表、粮食库存数量汇总表等 4 类报表及导出。

2.7.4 数据上传

完成现场粮食数量库存检查的测量和计算后, 软件生成库级数据结果, 按照国家库存检查规定的格式和接口要求, 将数据上传至上级管理平台, 实现数据的集中统一汇总和统计分析。

3 应用情况

根据全国粮食大清查试点省份工作安排, 本研究提出的便携式粮食库存数量检测设备进行了大量的现场实仓测试(如图 11), 覆盖了平房仓、浅圆仓、楼房仓、罩棚仓等多种仓房类型, 包含了小麦、玉米、大豆和稻谷等品种。经过 10 个省

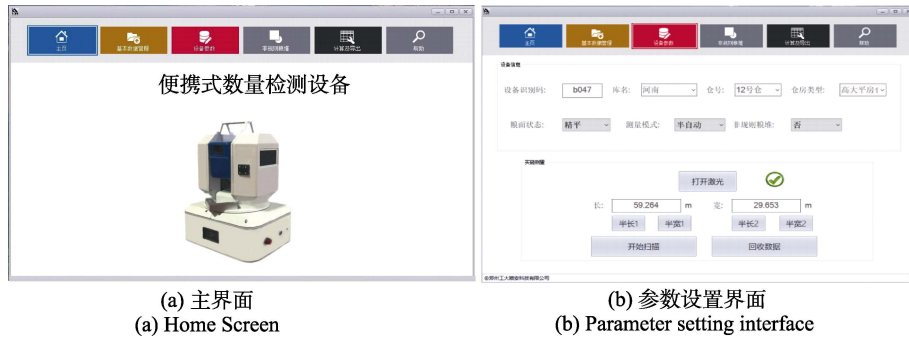


图 10 管理软件界面图
Fig.10 Management software interface

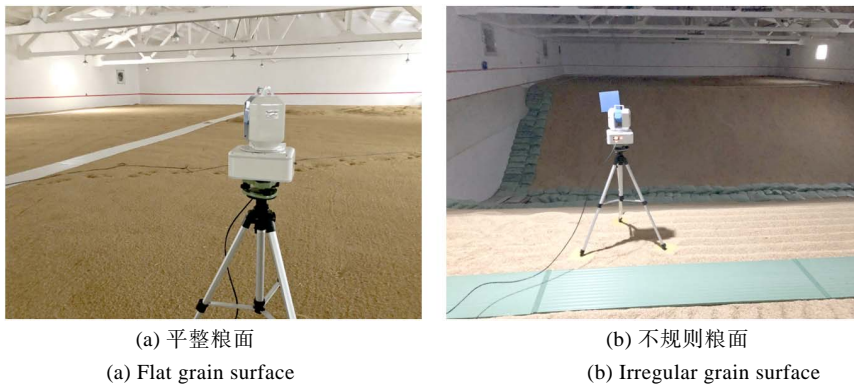


图 11 设备现场应用实景
Fig.11 Field application of the device

份 56 个库区中的 427 个仓房的全过程检测和验证，设备检测误差在 2% 以内，结果准确、客观，单仓检测时间 7~10 min，操作简单便捷，便于结果的统计与汇总，提高清仓查库结果的客观性和可靠性，为现场实物检查提供了一种有效先进的检测手段。

4 结论

针对国家粮食实物库存数量大清查工作中的不足，利用光电技术和机械机构研发了一套能够三维激光扫描，自动测量、自动计算、小型化的粮食库存数量便携式检测设备；构建了适用于便携式粮食实物库存检测的自适应粮堆体积测量方法和粮堆平均密度模型；通过现场实仓测试，验证了检测设备的测量精度和适用性，为粮食实物库存数量检查提供了一种全新的测量方法和技术手段。

参考文献：

[1] 祝玉华, 陈军涛, 甄彤, 等. 储粮数量检测技术研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 116-122.
ZHU Y H, CHEN J T, ZHEN T, et al. Research progress of grain quantity detection technology[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 37(6): 116-122.

[2] 任正晓. 粮食库存检查实务[M]. 北京: 中国商业出版社,

2007: 17-22+25.
REN Z X. Practice of checking grain stocks[M]. Beijing: China Commercial Press, 2007: 17-22+25.

[3] 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 P. Research on rapid measurement technology for grain storage volume based on three-dimensional laser scanning[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[4] 朱铁军, 施艳舞, 孟凡刚, 等. 激光扫描技术测量粮堆体积试验[J]. 粮食科技与经济, 2012, 37(4): 30-31.
ZHU T J, SHI Y W, MENG F G, et al. Study on measuring grain bulk by laser scanning[J]. Grain Science and Technology and Economics, 2012, 37(4): 30-31.

[5] 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 L M, LIU Y C, XU Q K, et al. Experimental study on bottom pressure of bulk grain pile[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(4): 1-4.

[6] 许启铿, 揣君, 曹宇飞, 等. 散粮堆底部压力颗粒流数值模拟分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 126-130.
XU Q K, CHUAI J, CAO Y F, et al. Numerical simulation of bottom pressure of bulk grain pile by PFC[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 126-130.

[7] 戚迎花. 散储粮储藏容重与若干影响因素的关系试验研究及离散元模拟[D]. 河南工业大学, 2014.
QI Y H. Experimental study and discrete element simulation on the relationship between bulk grain storage bulk density and some influencing factors[D]. Henan University of Technology, 2014.

[8] 张世杰. 散装粮堆密度与深度变化关系及压力传感器研究[D]. 河南工业大学, 2015.
ZHANG S J. Study on the relationship between density and depth of bulk grain pile and pressure sensor[D]. Henan University of Technology, 2015.

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (http://lspkj.ijournal.cn)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。