

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之四/“新理念和新方法”分栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.004

许启铿, 刘永超, 袁庆利, 等. 基于进出仓作业频繁的筒仓散粮堆平均密度计算方法研究及应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 27-32.  
XU Q K, LIU Y C, YUAN Q L, et al. Research and application of average density calculation method for particulate grain silo for grain processing enterprises[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 27-32.

# 基于进出仓作业频繁的筒仓散粮堆 平均密度计算方法研究及应用

许启铿<sup>1</sup>, 刘永超<sup>2</sup>, 袁庆利<sup>3</sup>, 吴强<sup>1</sup>, 周志耀<sup>2</sup>, 王俊岭<sup>4</sup>, 韩峰<sup>5</sup>

1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 河南工大设计研究院, 河南 郑州 450001;
3. 郑州工大粮安科技有限公司, 河南 郑州 450001;
4. 河南工业大学 理学院, 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:** 散粮堆的平均密度是粮食库存数量实时在线检测的重要参数。为解决粮食加工企业库存数量盘点中存在的散粮堆平均密度取值难题, 在对比分析了现有方法的基础上, 提出了一种适用于粮食加工企业进出仓作业频繁的筒仓散粮堆平均密度计算方法, 并选取一个稻谷筒仓的完整进出粮过程, 对该方法的测量精度和实用性进行实验验证, 结果满足使用要求。该方法简单实用, 精度较好, 克服了现有修正系数法的不足, 为粮食加工企业动态库存数量盘点提供了技术手段。

**关键词:** 粮食加工企业; 散粮堆; 平均密度; 修正系数; 库存数量

中图分类号: S-03; TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0027-06

网络首发时间: 2023-03-09 11:41:27

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.0936.002.html>

## Research and Application of Average Density Calculation Method for Particulate Grain Silo for Grain Processing Enterprises

XU Qi-keng<sup>1</sup>, LIU Yong-chao<sup>2</sup>, YUAN Qing-li<sup>3</sup>, WU Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-yao<sup>2</sup>,  
WANG Jun-ling<sup>4</sup>, HAN Feng<sup>5</sup>

1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Henan University of Technology Design and Research Academy, Zhengzhou, Henan 450001, China;
3. Zhengzhou Gongda Grain Security Technology Co., LTD., Zhengzhou, Henan 450001, China;
4. School of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
5. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract:** The average density of particulate grain pile is an important parameter for real-time online measurement of grain stock quantity. In order to solve the problem of calculating the average density of particulate grain pile in the inventory of grain processing enterprises, a calculation method for the average density of

收稿日期: 2022-12-28

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.

particulate grain pile in silos was proposed based on the comparison and analysis of the existing methods. Besides, a complete process of grain filling and discharging of a rice silo was selected to verify the measurement accuracy and practicability of the method. The results shows the method meet the requirements of use. This method is simple, practical, and accurate. In addition, the method overcomes the shortcomings of the existing correction coefficient method and provides technical means for dynamic inventory count in grain processing enterprises.

**Key words:** grain processing enterprises; particulate grain pile; average density; correction coefficient; storage quantity

粮食库存数量是十分重要的仓储管理数据资产，对于国家政策性粮食仓储保管单位和企业，“确保储备粮油数量真实”是仓储保管的基本要求之一；对于面粉厂、饲料厂等粮食加工企业，实时掌握粮食库存数量是其生产经营和财务核算的重要依据。

散粮堆的平均密度是指整个散粮堆的重量与其体积的比值，即散粮堆体积与平均密度的乘积为其库存数量。传统的散粮堆体积采用人工测量方式，但受限于粮堆形状，仅适用于规则粮堆；对于不规则粮堆，为了测量准确和方便，通常需要将粮面平整规则后才能进行人工丈量。随着信息技术发展，采用激光雷达三维扫描技术<sup>[1-2]</sup>，可以快速获取粮堆表面测点空间坐标数字化信息，进而采用积分算法可以实现不规则粮堆体积的高精度测量，解决了散粮堆体积计算问题。然而，由于散粮堆是一种散体颗粒，具有复杂多变的物理和散体力学特性<sup>[3-4]</sup>，在实际存储过程中，散粮堆的平均密度会受到粮食品种、粮堆高度、堆积过程、储存时间，通风、震动等多种因素影响<sup>[5]</sup>。长期以来散粮堆平均密度的取值问题尚未得到有效解决，成为困扰粮食仓储行业库存监测和日常盘点的技术难题。

国家组织政策性粮食库存大清查，提出了一套粮堆平均密度计算方法，一定程度上解决了国家储备粮库粮堆平均密度取值问题。然而，由于粮食加工企业进出仓作业比较频繁，粮食周转快，粮堆状态复杂多变，与长期储藏的国家储备粮不同，该方法并不适用。粮食加工企业迫切需要解决粮堆平均密度取值难题，为粮食库存盘点提供基础数据。因此，研究解决适用加工企业的粮堆平均密度计算问题是十分必要的，具有重要的应

用价值。

## 1 现行计算方法及对比

### 1.1 修正系数法

在国家政策性粮食库存大清查工作中，粮食库存实物检查时通常从粮堆中扦取部分样品，用容重器或特制大容器等方法测量粮食在自然散落状态下的密度，再利用标准仓确定修正系数进行校正，获得与粮堆实际状态接近的平均密度。为了叙述方便，称该方法为修正系数法<sup>[6]</sup>，该方法是一种间接计算方法，计算结果受到多种因素的影响。

修正系数法要求，稻谷原则上密度测量使用 0.5 m<sup>3</sup> 的特制大容器，大豆则使用 1 m<sup>3</sup> 的特制大容器，如图 1 所示。稻谷的密度一般不低于 500 kg/m<sup>3</sup>，0.5 m<sup>3</sup> 稻谷的重量将超过 250 kg，取样和测量工作量较大，如果经常进行取样测量密度，将耗费大量的人力和物力，如果是大豆，则工作量更大。



图 1 特制大容器（稻谷）  
Fig.1 The special large container (rice)

修正系数法提供了散装粮的密度修正系数取值范围：稻谷、小麦、大豆正常范围为 1.01 ~ 1.03，玉米正常范围为 1.01 ~ 1.05。对装粮高度 10 m 以

上的, 位于公路、铁路、机场以及大型震动源附近的, 粮食超期储存的, 储存期间使用离心机有效通风等情况, 可适当放宽修正系数取值范围, 但稻谷、小麦最高不得超过 1.05。由此可见, 修正系数取值范围相对宽松, 0.01 代表一个百分点, 增加或减少 0.01, 粮堆的数量会相应变化百分之一, 这种影响作用是十分显著的。实际操作时修正系数取值会因人而异, 在一定程度上会导致测量统计结果失真。

上述方法适用于国家政策性粮食库存检查, 对于进出仓作业频繁的粮食加工企业而言, 采用上述方法存在诸多困难: 筒仓粮堆高度较大, 入仓取样不便; 每次取样工作量大, 需要耗费大量人力物力, 效率低下; 修正系数的影响作用显著, 但实际操作中取值会因人而异。显然, 国家政策性粮食库存检查计算粮堆平均密度的方法对于粮食加工企业盘查库存并不适用。

## 1.2 理论公式法

散粮堆的重量除以其体积即可得到散粮堆的平均密度, 如公式 1 所示。

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

上式:  $\bar{\rho}$ —散粮堆平均密度;  $M$ —散粮堆重量;  $V$ —散粮堆体积。

公式 (1) 是按照密度定义建立的, 据其计算的散粮堆平均密度方法称为理论公式法。与传统的修正系数法相比, 理论公式法是一种直接方法, 消除了一些假设和中间环节。然而, 理论公式法在实际中却很少被使用, 主要原因在于通常待检测粮堆的重量是未知的, 而复杂不规则粮堆的体积采用人工方式也难以准确测量, 故粮堆的平均密度无法获得。

## 2 筒仓粮堆平均密度计算方法

### 2.1 基本思路

通过实地调研某粮食加工企业生产过程发现, 散粮入仓后周转速度较快, 进出仓作业比较频繁; 散粮车需先进行过磅称毛重, 然后卸粮入仓, 最后再过磅称皮重, 毛重扣除皮重即为每一车粮食的净重。因此, 入仓作业期间, 每一次作

业结束后仓内粮食的重量可以根据入库作业记录统计得到。另一方面, 采用三维激光扫描技术, 可以快速获取粮堆表面的点云数据, 利用数学算法可以计算粮堆体积, 即使粮堆形状不规则, 计算的粮堆体积精度也能够满足要求。

因此, 按照简单实用的原则, 结合粮食加工企业进出仓流程特点, 参照稻谷大容重器的测试方法, 首先, 以 15%~20% 仓容量作为基准测量单元, 通过体积测量装置和地磅分别获取其准确的体积和重量数据, 进而计算得到该基准测量单元的粮堆平均密度值  $\rho_1$ , 作为后续进粮和出粮环节的基准平均密度; 接着再进行若干次进粮作业, 并测量当前粮堆体积  $V_i$  和获取对应过磅数据  $M_i$ , 计算当前体积下粮堆平均密度  $\rho_i$ ; 重复上述过程, 最终计算分析  $\rho_i$  与  $\rho_1$  的关系, 获得不同装粮体积下的粮堆平均密度  $\rho_i$ 。

### 2.2 计算公式

按照上述基本思想, 可以获得筒仓散粮堆平均密度的简化计算公式如下:

$$\rho_i = k\rho_1 \quad (2)$$

$$k = 1 + \left( \frac{V_i}{V_d} \right) \cdot \alpha \quad (3)$$

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i} \quad (4)$$

上式中:  $\rho_i$  为当前粮堆平均密度,  $\rho_1$  为第 1 次入粮作业粮堆的平均密度,  $k$  为粮堆平均密度修正系数,  $V_i$  为当前粮堆体积,  $V_d$  为筒仓的设计体积,  $\alpha$  为计算系数,  $M_i$  为第 1 次入粮作业粮堆重量,  $V_1$  为第 1 次入粮作业粮堆体积。

### 2.3 实验实施流程

按照上述基本思想, 具体实施流程如下:

(1) 三维激光扫描测量装置对空仓进行测量, 获取基础体积数据;

(2) 第 1 次入粮作业结束后, 通过出入库系统获取当前仓内粮食重量  $M_1$ , 并通过三维激光扫描测量装置检测粮堆体积  $V_1$ ;

(3) 第 2 次入粮作业结束后, 同样方法获取当前的粮食重量  $M_2$  和粮堆体积  $V_2$ ;

(4) 重复以上步骤, 直至入粮作业完成, 记

录相应的  $M_i$  和粮堆体积  $V_i$ 。

### 3 算法验证与应用

#### 3.1 实验仓概况

结合某粮食加工厂粮食库存数量动态盘点监管实际需求, 选取厂区某栋钢板筒仓作为实验仓。钢板筒仓直径 21.82 m, 总高度 33.30 m, 其中下部支撑柱高 12.00 m, 仓身高 14.15 m, 总仓容 5 000 t, 具体尺寸详见图 2 和图 3, 粮食品种为稻谷。仓内中部位置安装一台三维激光扫描测量装置, 用于实时测量粮堆体积, 同时, 结合厂区的出入库管理系统可对粮车过磅称重的数据进行提取和统计。

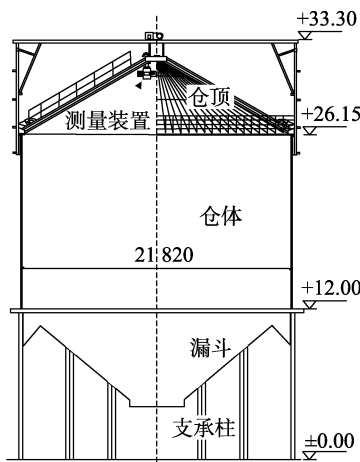


图 2 筒仓尺寸图

Fig.2 Dimensional drawing of silo



图 3 实验筒仓实景图

Fig.3 Photo of experimental silo

#### 3.2 测量装置

如何快速、准确地检测出作业期间不规则散

粮堆的体积是筒仓粮堆平均密度取值新方法的关键。粮食加工企业的生产仓一般不进行粮堆平整作业, 进出仓作业过程中形成粮堆形状是不规则的, 采用传统的人工丈量方式测算粮堆体积误差大、效率低、成本高。为了解决该问题, 采用本文作者科研团队研发的基于激光雷达的三维扫描测量装置, 将其安装在仓顶中部位置的下方。该装置可快速完成整仓粮堆空间坐标数据采集、点云数据处理与粮堆体积自动计算, 检测体积结果误差小于 0.5%。

#### 3.3 结果与分析

按照本文提出的筒仓粮堆平均密度计算方法, 对实验仓的完整进出粮作业周期进行了全程跟踪测试, 其中入粮作业 10 次, 出粮作业 16 次, 每次作业结束后利用测量装置实时检测当前粮堆体积, 同时提取对应的仓内粮堆过磅数据。利用入粮作业环节进行公式 (3) 中的待定系数  $\alpha$  的确定, 进而通过进出粮环节验证本文所提计算方法的合理性和准确性。

##### 3.3.1 待定系数 $\alpha$ 确定

按照上述实验实施流程, 可以获得当前粮堆测量体积和账面数量, 利用公式 (2) 至公式 (4) 可以计算获得待定系数  $\alpha$ , 列于表 1, 表中的“测量体积”为测量装置获取的当前粮堆体积, “账面数量”取值来源于过磅数据, “粮堆平均密度”为“账面数量”与“测量体积”的比值。

表 1 稻谷筒仓进粮作业动态监测结果及系数  $\alpha$  计算表  
Table 1 Dynamic monitoring results and coefficient  $\alpha$  of rice silo feeding operation

序号	测量体积 $V/m^3$	账面数量 $M/t$	粮堆平均密度 $\rho_1/(kg/m^3)$	计算系数 $\alpha$
1	758.53	435.82	574.56	/
2	1 089.32	626.32	574.96	0.003
3	1 331.78	760.36	570.94	-0.024
4	1 777.21	1 016.10	571.74	-0.014
5	1 982.39	1 131.06	570.55	-0.018
6	2 035.19	1 164.08	571.98	-0.011
7	2 435.04	1 403.44	576.35	0.006
8	3 038.79	1 771.06	582.82	0.024
9	3 293.88	1 921.50	583.35	0.023
10	3 608.79	2 110.48	584.82	0.025

根据表 1 的计算结果可以看出, 粮堆平均密度与粮堆体积总体上呈现正相关趋势, 待定系数  $\alpha$  最大值为 0.025, 结合图 4 对应的粮堆平均密度与粮堆体积变化关系, 按照最大值包络原则, 本文选定公式 (3) 中的待定系数  $\alpha = 0.02$ 。

从图 4 的趋势可以看出, 公式 (3) 中的代表

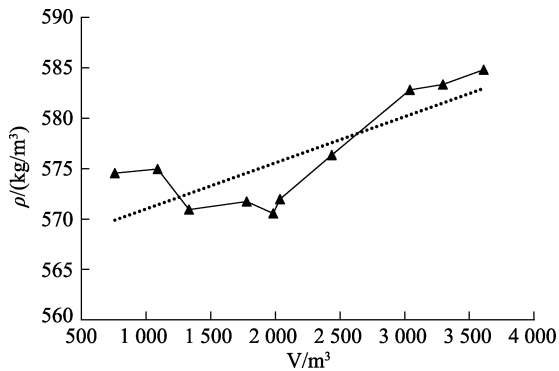


图 4 入仓作业环节粮堆平均密度与粮堆体积变化趋势图  
Fig.4 Chart of change trend of average density and volume of grain pile during warehousing operation

粮堆测量体积  $V_i$ , 反映了粮食品种、粮堆高度、堆积过程等影响粮堆平均密度的主要因素及其影响规律。

### 3.3.2 进出粮过程数据结果与分析

按照本文计算方法及待定系数取值, 计算整个进出粮过程的粮堆计算数量及误差率, 结果详见表 2 所示。

从表 2 和图 5 可以看出, 进出粮全过程 26 次作业的总体平均误差率为 0.18%, 除了第 3~6 次进粮作业及第 26 次出粮作业以外, 其余大部分误差率都在 1% 以内, 测量精度总体上满足使用需求, 考虑到测试系统误差的影响, 表明采用本文散粮堆平均密度计算方法能够获得较好的测量精度。与修正系数法相比, 避免了推导计算的中间环节, 进而消除了相关误差, 可以为粮食加工企业的筒仓库存数量动态盘点提供简便有效的测试技术。

表 2 采用本文算法的稻谷筒仓进出粮作业动态库存数量监测结果统计表

Table 2 A statistical table of monitoring results of dynamic inventory quantity in and out of rice silo operation based on the algorithm proposed in this paper

序号	测量体积 $V/m^3$	账面数量 $M/t$	计算数量 $M'/t$	误差率 $\delta /%$	备注	序号	测量体积 $V/m^3$	账面数量 $M/t$	计算数量 $M'/t$	误差率 $\delta /%$	备注
1	758.53	435.82	/	/	进粮	14	3 391.85	1 980.502	1 975.262	-0.26	进出粮
2	1 089.32	626.32	628.607	0.37	进粮	15	3 148.95	1 837.219	1 832.050	-0.28	出粮
3	1 331.78	760.36	769.264	1.17	进粮	16	2 915.52	1 700.589	1 694.677	-0.35	出粮
4	1 777.21	1 016.10	1 028.373	1.21	进粮	17	2 655.69	1 545.624	1 542.062	-0.23	出粮
5	1 982.39	1 131.06	1 148.034	1.50	进粮	18	2 471.94	1 436.669	1 434.321	-0.16	出粮
6	2 035.19	1 164.08	1 178.858	1.27	进粮	19	2 132.49	1 236.842	1 235.695	-0.09	出粮
7	2 435.04	1 403.44	1 412.704	0.66	进粮	20	1 930.09	1 122.491	1 117.514	-0.44	出粮
8	3 038.79	1 771.06	1 767.190	-0.22	进粮	21	1 710.82	993.62	989.695	-0.39	出粮
9	3 293.88	1 921.50	1 917.467	-0.21	进粮	22	1 500.73	871.128	867.436	-0.42	出粮
10	3 608.79	2 110.48	2 103.397	-0.34	进粮	23	1 203.27	695.618	694.678	-0.14	出粮
11	3 371.25	1 969.355	1 963.106	-0.32	出粮	24	969.27	557.449	559.063	0.29	出粮
12	3 401.94	1 982.680	1 981.217	-0.07	进出粮	25	840.69	481.613	484.651	0.63	出粮
13	3 227.36	1 880.971	1 878.250	-0.14	出粮	26	590.83	335.071	340.270	1.55	出粮

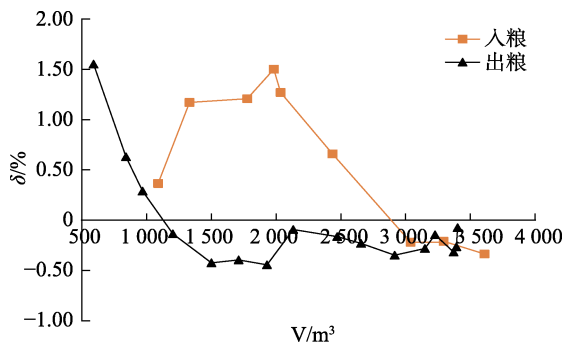



图 5 误差率与粮堆体积变化趋势图  
Fig.5 Error rate and trend of grain volume changes

## 4 结论

为了解决粮食加工企业盘点库存数量工作中存在的难点问题, 结合粮食加工企业仓储作业的特点, 在对比分析现有方法的基础上, 提出了基于三维激光雷达测量装置的筒仓散粮堆平均密度计算方法, 并通过实仓进出粮作业环节进行了测量精度和实用性验证。针对筒仓存放稻谷情况, 使用第一次入粮结束后的粮堆数量和粮堆体积计

算得到的粮堆平均密度作为基准,并结合粮堆体积与平均密度相关性规律,可以为筒仓库存数量动态盘点提供切实可行的测试技术,结果精度能够满足使用要求,可以采用本文研究方法进一步扩大小麦、大豆、玉米等品种相关问题研究,为有效解决粮食加工企业库存数量动态监测提供技术支持。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 厚美瑛, 陆坤权. 奇异的颗粒物[J]. 新材料产业, 2001, 2, 6-8.  
HOU M Y, LU K Q. Strange particulate matter[J]. New Material Industry, 2001, 2, 6-8.
- [4] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
SUN Q C, WANG G Q. Mechanics of particulate matter[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] 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.
- [6] 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. 

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。