

一种新型粉料料位计量系统的开发及实验

杨建红, 张认成, 房怀英

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于标准测力称量传感器开发连续式料位计量系统,通过料仓粉料堆积的理论计算,构建料位和侧壁压力之间数学模型.最后,通过具有称量计量系统的标准粉罐对所研制的料位计量系统进行标定.对比实验结果表明:实际测量的粉料料位和雷达料位计计量结果基本一致;通过误差补偿和标定后的粉料料位计,其计量精度能满足水泥搅拌站的需求;新型料位计具有防尘、线性度好、成本低等优点.

**关键词:** 料位计; 粉料; 压力薄膜; 线性度; 测量误差

**中图分类号:** TM 343.03 **文献标志码:** A

水泥搅拌站及其水泥厂有很多水泥粉罐,为了及时掌握水泥罐中料位的情况,罐中水泥粉的料位连续计量是非常重要的.粉料料位的计量主要采用阻旋式、电容射频导纳和雷达等方法<sup>[1-3]</sup>.阻旋式料位计无法实现粉料料位的连续计量,仅仅作为料位开关使用.电容射频导纳式料位计,通常采用金属缆绳作为电容的一个基板,另一极板为粉罐内壁.这种测量方式能实现粉料料位的连续计量,但是对于粉料的含水率不同,经常出现挂料现象,导致测量准确度低下<sup>[4]</sup>.雷达是粉料料位连续计量非常好的方式,但是也存在粉尘污染的问题,同时雷达连续式料位计价格十分昂贵<sup>[5-7]</sup>.因此,本文基于称量膜片开发力感应式粉料料位连续计量系统,开发一种新型粉料料位计量方法.

1 料位计量系统设计

考虑到结构简单和受力的均匀性,所开发的力感应连续式料位计主要包括:称量测量膜片、机械预紧机构、调理放大电路和单片机系统等.称量测量膜片采用美国进口的 FlexiForce A401;薄膜的厚度为 0.208 mm;敏感区域直径为 25.4 mm;线性误差为±3%;重复性为±2.5%;工作温度为-9~70 ℃.料位计量系统的探头整体结构,如图 1 所示.

图 1 中,前后挡板采用不锈钢经过平面磨削加工而成,为了避免粉料渗入到称量膜片,在料位计的最前端采用不锈钢片,并通过橡胶密封圈进行密封.预紧力调节螺栓主要用于调整称量膜片的预紧力,使称量膜片有个合适的偏置量.所开发的连续式料位计安装方便,直接用装配螺钉固定于粉料料仓底部. A401 内部是相当于一个可调的薄膜电阻,用 5 V 电压激励,当没有压力时,膜片输出端的响应为零,当膜片受到压力作用时,输出微小的电压信号响应,输出端接运算放大器,将输出电压放大到 0~5 V,单片机采集输出电压信号,通过电压信号标定粉料料位,从而实现粉料料位的精确计量<sup>[8]</sup>.所开发的新型连续式料位计量系统的组成,如图 2 所示.料位计

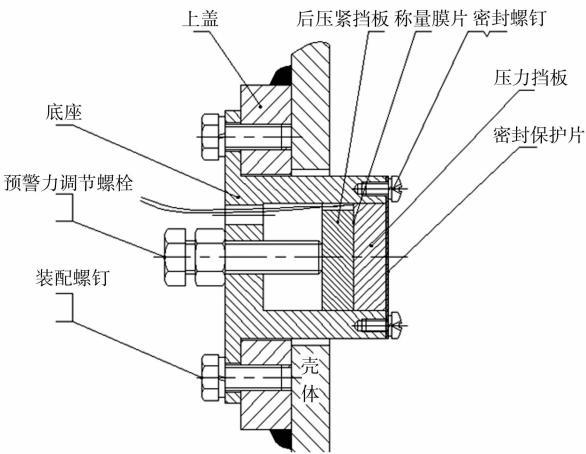


图 1 连续式料位计探头结构

Fig.1 Structure of continuous material level measurement probe

的机械部分全部采用不锈钢加工而成。

2 基于理论模型的误差补偿

2.1 粉料料位理论模型<sup>[9-10]</sup>

由于粉料在料仓内部的密度分布不均匀,因此粉料料仓侧壁的压力和料位之间存在一定的非线性关系,应分别对每一个位置的粉料密度进行计算。由国家标准 GB 50077—2003《钢筋混凝土筒仓设计规范》规定可得,粉料罐顶面或粉罐椎体重心以下距离  $S$  处,粉料作用于粉罐侧壁单位面积上的水平压力  $P_h$ ,其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} P_h &= C_h \gamma \rho (1 - \exp(\mu S k / \rho)) / \mu, \\ k &= \tan^2(45 - \varphi / 2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中:  $C_h$  为深仓粉料水平压力的修正系数,当  $h_n/d_n > 3$  时,取  $1.1C_h$ ,当流动性较差时,则取  $0.9C_h$ ;  $\gamma$  为粉料的密度;  $\rho$  为料仓水平净截面半径,  $\rho = d_n/4$ ;  $\mu$  为粉料与仓壁的摩擦系数;  $k$  为粉料侧压力系数;  $\varphi$  为粉料的内摩擦角。料位顶面或粉料重心以下距离  $S$  处,料仓侧壁单位面积上的水平压力为  $P_h = k\gamma S$ 。

2.2 测量误差补偿

由上述的粉料料位理论模型可以知道,粉料料位和料仓侧壁压力之间是非线性关系,同时料位顶面有可能出现较大的斜面,造成料位测量误差较大。对于水泥搅拌站,粉料料位的测量准确度要求不高,但是必须有较高的可靠性。式(1)中,以料仓侧壁压力来间接表征料位高度存在非线性误差。料仓侧壁压力的输出电压 ( $U$ ) 和料位 ( $h$ ) 之间关系曲线,如图 3 所示。

设式(1)中  $Q = \mu k / \rho$ ,  $Q$  表示料仓侧壁压力和料位之间的线性度。当  $Q$  取不同值时,料仓侧壁压力和料位之间的线性度不同,  $Q$  值越小,线性度越好。  $Q$  值受料仓的净截面半径、粉料与仓壁的摩擦系数和粉料侧压力系数影响,当净截面半径取较大时,  $Q$  能满足较小的取值,水泥搅拌站的净截面半径较大。采用钢板作为料仓侧壁,粉料仓壁之间的摩擦系数较小,因此实际水泥搅拌站的粉罐侧壁压力和料位之间近似成线性关系。为了减小料位倾斜带来的测量误差,可采取沿料仓对称方向同时安装两个料位计探头,然后求取两个料位计输出信号的平均值,提高料位测量精度。

3 实验结果及分析

3.1 计量系统称质量标定

为了验证上述开发的粉料料位计量系统的精度和可靠性,在试验场构建一个粉料标定系统。标定系统的粉罐结构和水泥搅拌站现场的粉罐结构一样,尺寸按照一定比例缩小,粉罐下面直接采用托利多称量计量系统进行称质量,用粉料泵将水泥打入粉罐中,粉罐最大载质量为 10 t,在粉罐侧壁底部位置安装所开发的料位计量系统,每次装料或卸料约 0.5 t,每进行一次装、卸料,记录料位计量系统输出电压信号。实验按照以下 4 个步骤进行。

- 1) 调节图 1 中预紧螺栓的预紧力,当无粉料时,使粉料料位计量系统输出电压为 1.5 V。
- 2) 每次装料约 0.5 t,待计量系统输出电压稳定下来后,记录输出电压。
- 3) 当料仓装满后,开始卸料,每次卸料约 0.5 t,记录每次卸料后计量系统输出电压值。

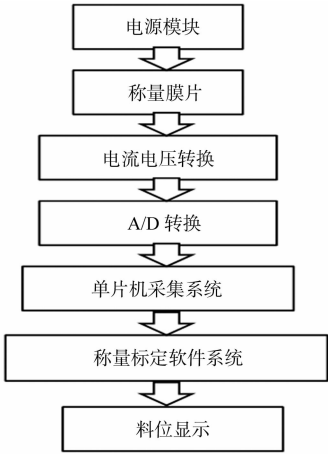


图 2 连续式料位计量系统组成  
Fig. 2 Composition of continuous material level measuring system

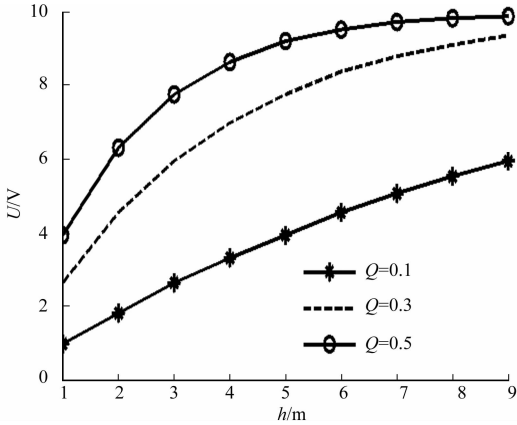


图 3 料位和侧壁压力关系  
Fig. 3 Relationship between material level and wall pressure

4) 重新调整预紧力, 无粉料时, 使粉料计量系统输出电压为 1.0 V, 重复步骤 1)~3)。

上料和卸料过程中粉料质量( $m$ )和料位计量系统输出电压信号( $U$ )之间的关系, 如图 4 所示。从标定结果可以看出: 图 4(a)为加料标定实验, 重复两次实验, 两次测量的重复性较好, 粉料质量和计量系统输出电压之间基本上成近似线性关系; 图 4(b)为卸料标定实验, 两次结果的重复性效果稍差, 同时卸料时, 计量系统输出电压和粉料质量之间线性度较差。这主要是因为卸料过程中, 粉料料位面经常会出现较大的倾斜, 导致两边的侧壁压力不一致, 通过两个料位测量互相补偿可以减小测量误差。

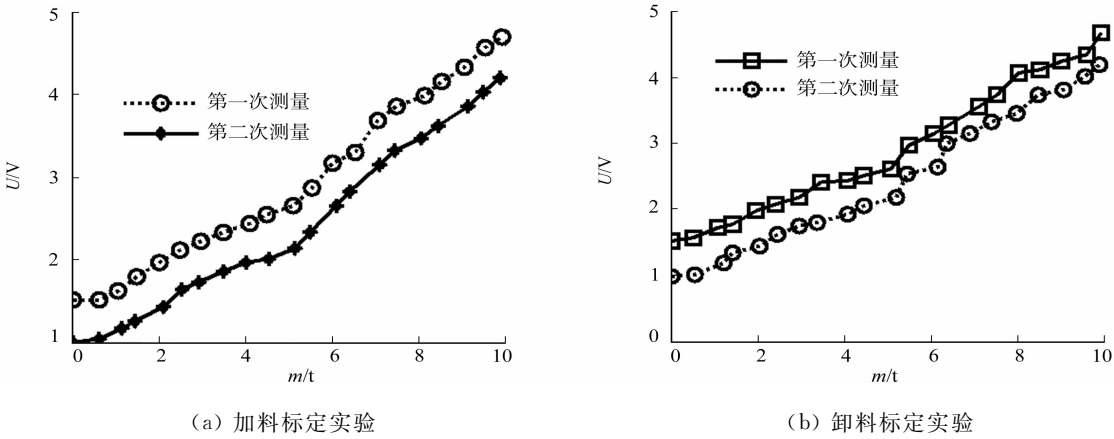


图 4 粉料计量系统标定实验  
Fig. 4 Calibration experiment of material level measuring system

3.2 标定后对比实验

为了验证所开发的料位计量系统的精度和可靠性, 将标定后的料位计量系统安装在施工现场的粉罐中, 粉罐也同时安装雷达式射频导纳料位计。进行了两次重复性实验, 每次测量 10 个点, 测量结果如表 1 所示。雷达式料位计采用的是西门子的 SITRANS LR 260 型料位计, 监测量程可达 30 m, 测量精度高, 可作为实验基准; 连续式射频导纳料位计采用长陆的 MEC-20A1BC0/L7000 型。表 1 中:  $h$  为料位;  $e_1, e_2$  分别为射频导纳料位计和新开发料位计与雷达式料位计的测量误差;  $\delta$  为新开发料位计与雷达式料位计的测量相对误差。

表 1 几种粉料料位计的测量对比  
Tab. 1 Comparison measurement of different material level

次数	$h/mm$			$e_1/mm$	$e_2/mm$	$\delta/\%$
	雷达式料位计	射频导纳料位计	新开发料位计			
1	2 386	2 321	-65	2 298	-88	3.7
2	3 162	3 087	-75	3 224	62	2.0
3	3 991	4 034	43	3 912	-79	2.0
4	4 788	4 746	-42	4 893	115	2.4
5	5 576	5 611	35	5 513	-63	1.1
6	6 892	6 823	-69	6 943	51	0.7
7	7 756	7 790	34	7 796	40	0.5
8	8 649	8 718	69	8 592	-57	0.7
9	9 382	9 343	-39	9 334	-48	0.5
10	9 868	9 908	40	9 943	75	0.8

以雷达料位计为参考基准, 新开发料位计测量料位的标准差为 70.99。从表 1 可知: 为满足搅拌站粉罐实际测量的需求, 射频导纳式料位计测测量精度要比开发的料位计要准确; 但是对于水泥搅拌站来说, 所开发的粉料料位计量能满足水泥料位的计量精度。同时, 随着时间的推移, 射频导纳式料位计很容易粘料, 尤其在粉罐卸料的过程中, 导致测量精度大幅度下降, 在较大的水泥粉罐中是很难清理的。

4 结论

针对水泥搅拌站中要求连续式粉料料位计价格低、性能可靠的特点, 基于压力薄膜, 通过测量粉罐

侧壁压力,开发了新型粉罐连续式料位计. 水泥搅拌站中的粉罐侧壁压力和粉料料位存在一定的模型关系,通过粉料的堆积密度建立粉罐侧壁压力和粉料料位之间的数学模型,仿真得到了粉罐侧壁单位面积平均压力和粉料料位的关系曲线. 作为所开发的料位计误差补偿依据,缩小比例设计了粉罐标定系统,粉罐下面采用称量传感器对罐中含料量进行计量,得到基于大量的实验标定侧壁单位面积所受的平均应力和粉料料位的关系曲线.

通过侧壁压力和料位之间的非线性理论分析,对测量误差进行了研究,并标定得到合适的比例系数. 标定后的连续式料位计对比实验表明:通过误差补和标定后偿后,所开发的新型连续式粉料料位计能满足施工现场的测量要求,且不受粘料等因素的影响,力感应连续式料位计成本低,安装维修方便,在粉料的连续计量领域具有较好的市场前景.

参考文献:

[1] 孙春亮. ALF3 贮仓料位计在线监控系统开发与应用[J]. 轻金属,2005(9):26-28.  
[2] 杜建吉,刘建勋. 料位监控技术在 DTM320/580 球磨机上的应用[J]. 中国电力,2000,33(4):56-58.  
[3] 王恒,贾民平,陈左亮. 基于 LS-SVM 和机理模型的球磨机料位软测量[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):92-95.  
[4] 段广云,巩建国. 微硅粉增密仓料位实时监测系统的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器,2011,27(8):61-63.  
[5] 崔宝侠,李明,徐冰. 小波包在双进双出磨煤机料位检测中的应用[J]. 沈阳工业大学学报,2008,30(3):341-345.  
[6] 段勇,崔宝侠,徐冰,等. 基于多传感器信息融合双进双出磨煤机料位检测[J]. 机械工程学报,2010,46(24):61-66.  
[7] 谢莉. 料位传感器在沥青混凝土摊铺机中的应用[J]. 交通标准化,2009(1):163-165.  
[8] 陈宇,郑力新. 利用自适应遗传算法优化滤波电路参数[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(3):272-274.  
[9] 孔德玉. 粉料堆积密度测定方法的改进及应用[J]. 实验室研究与探索,2000(5):46-49.  
[10] 中国煤炭建设协会. GB 50077—2003 钢筋混凝土筒仓设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004:263-270.

Development and Experiment Study of a Novel Material  
Level Measurement for Powder

YANG Jian-hong, ZHANG Ren-cheng, FANG Huai-ying

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A novel continuous material level measurement for powder was developed based on a standard weighting sensor. And, the mathematical model between material level and sidewall pressure of powder tank was constructed by theoretical calculation of dumped powder in the tank. Then, the new developed material level measurement system was calibrated by a standard tank with weighting and measuring system. Contrast experiment proved that the measurement result of novel material level was consistent to that of radar level gauge. The novel material level measuring system of powder can meet the requirement of measurement precision in cement mixing system by error compensation and calibration. The new developed material level measuring system and has some advantages, such as dustproof, good linearity and low cost.

**Keywords:** material level measurement; powder; pressure film; linearity; measurement error

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 杨建红)