

被称物料物理特性与工业衡器相关的技术措施

□上海大和衡器有限公司 陈日兴

【摘要】本文首先从工业衡器现场被称散状物料特性的理论知识介绍着手，进一步根据物料称重及配料系统特点，为工业衡器产品研发和工艺设计人员提供如何针对使用现场散状物料特性对称重系统性能影响的知识，从而根据不同的物料特性，设计不同的产品结构，提高产品稳定性与整机准确度等级。

【关键词】物料物理特性；散状物料；工业衡器

文献标识码：A 文章编号：1003-1870 (2024) 07-0011-08

前言

在我国工业原料制造业中，固体散料的成型、装卸、包装、储存、运输和生产加工工艺过程中固体、粉体原料的物性参数是生产工艺系统设计的重要基础。同样，上述物料的特性将会直接影响其中配套的工业衡器称重系统的称量准确度。自动衡器的被称物料特性，又直接影响自动衡器动态控制精度的速度、准确度与稳定度。例如：在衡器产品的料仓、料斗的设计中，将会考虑被称物料的休止角、物料的流动特性。在被称物料各种输送装置的设计过程中，为了使物流量恒定，对于被称物料的粒径、堆积密度、内外摩擦角等物性参数要有所了解。上述固体、粉体物料由于品种繁多，特性参数相差又大，有必要对此类物料特性进行专门的分析与测试。在国外先进的工业衡器制造企业，一般都设有专门的物料试验室，例如，在衡器产品的合同签订前，首先由用户说明被称物料特性或提供物料试样，由衡器生产企业在本公司的物料实验室进行测试，然后制定个性化设计方案，再行签订供货合同。但是较为遗憾的是，国内不少衡器制造企业对于这个问题重视不够，结果造成很多生产出的衡器产品在用户的现场使用过程中出现不能满足用户的要求。

本文首先就工业衡器称重过程中有关的各种固体、粉体物料的几个主要物理特性指标的分析 and 测

试方法以及对于衡器称重准确度的影响，来看其重要性。

1 物料的物理特性介绍^{[1][2]}

根据常规的知识，散状物料的物理特性主要有：磨琢性、硬度、颗粒性、密度、细度、安息角、内摩擦角、外摩擦角、黏着性、附着性、流动性、渗透性、导电性、吸湿性、易碎性、易燃易爆性等参数。基于工业衡器被称物相关物理特性的主要关注点，本文重点介绍了对散状物料的粒度、密度、流动性、安息角、内外摩擦角、流动性等参数的定义及测试方法。

1.1 散状物料

散状物料系指呈松散状态的粉状、颗粒状、块状物料，简称为散料，也可称为粉粒体物料。

1.2 物料粒度

粒度定义：粒度是指固体散料颗粒（或物料块）的尺寸大小，见表1。

一般粒度按标准块尺寸 a' 确定：

对于已经分选的材料：

$$a' = 1/2 (a_{\max} + a_{\min})$$

式中： a_{\max} ——物料中最大块尺寸，mm；

a_{\min} ——物料中最小块尺寸，mm。

对于未经分选的材料：

$$a' = a'_{\max} \text{ 或 } a' = 0.8 a'_{\max}$$

表1 物料粒度的分类

名称	物料特性	名称	物料特性
尘状	$a' \leq 0.05\text{mm}$	小块	$10.0 < a' \leq 60.0\text{mm}$
粉状	$0.05 < a' \leq 0.5\text{mm}$	中块	$60.0 < a' \leq 160.0\text{mm}$
细粒	$0.5 < a' \leq 2.0\text{mm}$	大块	$a' \geq 160.0\text{mm}$
大粒	$2.0 < a' \leq 10.0\text{mm}$	不规则	纤维状、交错、缠结

(1) 粒度分布。散状物料中所含的不同粒度的颗粒(或块状)的质量分布状况,称为粒度分布(或称颗粒组成)。

(2) 平均粒径。固体散料颗粒尺寸大小算术平均值称为平均粒径。上述标准块尺寸 a' 即为平均粒径。

1.3 物料密度

物料密度定义:固体散料的密度是单位体积的物料质量。由于散料的体积是多个离散的颗粒聚集而形成的体积,通常有空隙,与一般的连续相液体、

固体有区别。根据物料体积(容积)的取法分类,散料密度可分为真密度、堆积密度及填实密度三个最常用的密度参数。

真密度 ρ ——指固体物料的质量除以不包括内、外孔隙在内的物料真体积,即所谓的物质密度。一般在重力式自动装料衡器的承载器设计中不采用此指标。

堆积密度——指固体物料的质量除以包括物料全部空隙面内的整个填充层的体积。根据物料的堆积密度可将物料分为四级,见表2:

表2 物料的堆积密度等级

级别	程度	容积密度	典型物料
1	轻	$< 0.6 \text{ t/m}^3$	木屑、粉状类
2	中	$0.6 \sim 1.1 \text{ t/m}^3$	原煤、矿石
3	重	$1.1 \sim 2 \text{ t/m}^3$	砂、水泥熟料
4	极重	$> 2 \text{ t/m}^3$	铁、铅、锰矿石

填实密度——是在堆积密度测试的基础上利用振动的方法破坏固体散料颗粒之间的间隙空间而得到的密度参数。

固体散状物料的堆积密度与物料的含水率、粒度大小有关。一般来说,同一种物料堆积密度与其粒度的关系如下:

如果大块物料的堆积密度为 1 t/m^3 ,则中、小块物料的堆积密度是 0.9 t/m^3 ,粒状物料则为 0.8 t/m^3 ,粉状物料为 0.7 t/m^3 。

当粒状、粉状物料自由堆放和压实后,其堆积密度变化也很大。在这些情况下其堆积密度可按下式计算:

$$\rho_m = K_m \times \rho_0$$

式中: ρ_m ——压实状态的堆积密度, t/m^3 ;

K_m ——物料堆积密实系数,一般 $K_m=1.05\sim 1.2$;

ρ_0 ——自然堆积时的堆积密度, t/m^3 。

1.4 安息角

安息角定义:安息角又称休止角,自然堆积角。表示散状物料自然堆积时形成的角度。料堆的形成通常是由物料缓慢下落形成。

安息角是最常用的表示固体散料流动性能数据,安息角越小表示物料的流动性越好。除了安息角外,还有在安息角基础上引出的崩溃角、差角、抹刀角等参数。

1.5 内摩擦角

内摩擦角定义:内摩擦角又称塌落角、下塌角,表示在散状物料内部、物料之间的摩擦力,即物料层之间的阻力。内摩擦系数和内摩擦角的关系,即

$$f_i = \operatorname{tg} \phi_i$$

式中： f_i ——内摩擦系数；

ϕ_i ——内摩擦角（°）

1.6 外摩擦角

外摩擦角定义：外摩擦角是固体散料与其他材料如器壁面之间形成的摩擦角。表示散状物料与其他坚硬表面之间的流动阻力。外摩擦角与外摩擦系数的关系如下：

$$f_e = \operatorname{tg} \phi_e$$

式中： f_e ——外摩擦系数；

ϕ_e ——外摩擦角（°）。

1.7 流动性

由于物料的流动性是直接影响自动衡器称重准确度的最主要影响因子之一，因此在自动衡器的结构设计中不能忽视。

流动性定义：散状物料的流动性是由物料的组成特性（密度、粒度、形状）、摩擦特性（内、外摩擦角）和机械强度等因素所决定，而表现为流动的难易度、堵塞、粘着及结块等。

（1）悬浮速度。在管道里，如果流体以等于固体的自由沉降速度向上运动时，则固体将处在一个水平上摆动状态，既不上升也不下降。此时流体的速度就称为该固体物料的悬浮速度。

（2）均匀度Uf。均匀度是指固体散料粒径和形状的统一程度，可以表示流动性能，通常是用筛分法来确定。具体方法是：试样物料60%通过的筛孔宽度除以试样物料10%通过的筛孔宽度，得到的数值称为均匀度。均匀度越大，流动性越差。

$$Uf = X_{60} / X_{10}$$

式中： X_{60} ——试样物料60%通过的筛孔宽度；

X_{10} ——试样物料10%通过的筛孔宽度。

（3）凝聚度Ch。凝聚度是指粉状的固体散料颗粒表面的表现粘结能力。

（4）分散度Ds。将一定量的试样物料从一定高度落下，又放置在底部的抛物状玻璃容器中残余的试样料重量计算出的百分比，定义为分散度。分散度是与分散性、扬尘性、放电性有关的物性。

除了上述介绍的散状物料的物理特性参数外，还有压缩率、侧压力系数、硬度等参数，由于篇幅关系就不一一介绍了。

2 物料物理性能测试^{[1][2]}

2.1 测试物料物理特性的环境条件

在现代工业中，原料配料的准确与否与物料的环境条件，即物料的物理特性休戚相关。

例如新型干法水泥生产中，回转窑窑尾生料粉输送计量控制、窑头和分解炉的煤粉输送计量控制等一些粉体物料的计量控制，物料的物理特性对产品的产量、质量起着至关重要的作用。

粉体物料在承载器中，由于粉体物料与块状或散粒状态下的物理特性在物料的流动性和自然堆积角这两个方面有着很大的不同，通常物料水分增加使得粉体物料的流动性变差，表现在物料趋于粘聚并有较大的附着性，水分越大其附着性越强，流动性越差。而干燥或伴有气流的粉状物料的流动性极强，表现为物料趋于自溢（自流动性），含气量越大，其流动性越强。

经过研磨后的粉体，在常态下带有一定的附着性，也就是实压时间常数较大，一般来说其流动性能较差。对于这类流动性较差的粉体物料的卸料，在实际中经常采用库侧充气破拱和库底充气助卸相结合的方式，来保证料仓内物料的顺利卸料。

由于粉体物料卸料方式的不同，造成了实际粉体物料在出仓时的流动性的巨大差异，也就是计量控制设备在受料时物料的流动性差异。对于需要充气助卸的粉体物料，充气量的大小和气流的速度对粉体物料的流动性影响都是非常之大的。在一些气源变化频繁的场所，有些传统的粉体计量控制设备通常会产生波动，严重时会出现振荡以至于无法工作。

2.2 测试物料物理特性仪器介绍

现介绍一种粉体综合特性测试仪，如图1所示。



图1 一种粉体综合特性测试仪外观图

粉体综合特性测试仪主要性能如下：

- (1) 振实密度、松装密度、安息角、抹刀角、崩溃角、差角、分散度、凝集度、流动度等；
- (2) 振实密度振动幅度：3mm；
- (3) 振实密度振动频率：250次/分钟；
- (4) 振实密度容器：100ml,25ml；
- (5) 适用范围：2000 μm 以下的所有粉体颗粒的特性测试。

2.3 物料物理特性测试方法

(1) 物料粒度测定方法

粒度测定方法有直接观察法、筛分法、沉降法、激光法、小孔通过法、流体通过法、吸附法等，其中以筛分法测定较为普遍。筛分法测量适合粒径范围在5 μm 至125mm。一般以干式筛分法为主，在细粉范围内也有采用湿式筛分法的。所谓筛分法就是用散料颗粒能否通过网孔的方法，通常采用一套标准筛进行粒度的测定，见表3。

表3 世界各国较为典型的标准筛序

泰勒标准				日本标准				美国标准			
W.S.Tyler Standard				JIS Z8801				ASTM E11-58T			
a (μm)	d (mm)	m (目)	α (%)	a (μm)	d (mm)	m (目)	α (%)	a (μm)	d (mm)	m (目)	α (%)
295	0.234	48.0	31.1	297	0.232	48.0	31.5	297	0.215	50.0	33.6
147	0.107	100.0	33.5	149	0.105	100.0	34.4	149	0.110	100.0	33.4
74	0.053	200.0	33.9	74	0.053	200.0	34.0	71	0.053	200.0	33.3
43	0.036	325.0	29.6	44	0.034	325.0	31.9	44	0.030	325.0	35.4
38	0.025	400.0	36.4					37	0.025	400.0	35.6

注：a——筛孔尺寸(μm)；d——筛丝直径(mm)；m——网目(1英寸长度上的孔数，目)； α ——空隙率(筛子的有效面积百分数，%)。

(2) 物料密度测定方法

一般物料的密度测定采用容器与称重结合的方法。

①压实状态的堆积密度测试过程见图2。

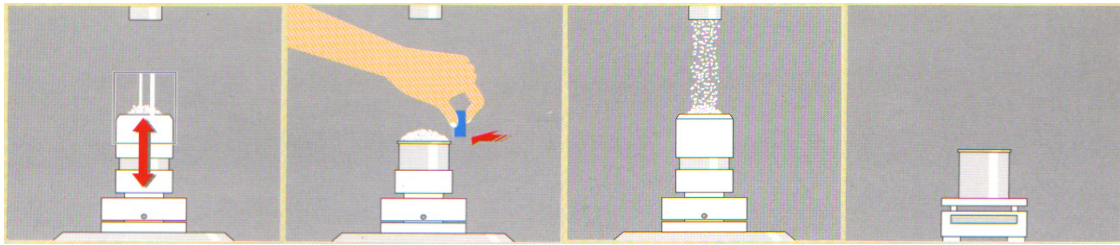


图2 压实状态的堆积密度测试过程示意图

②自然堆积状态的堆积密度测试过程见图3。

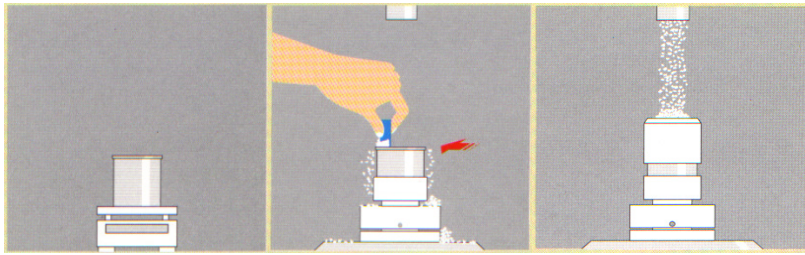


图3 自然堆积状态的堆积密度测试过程示意图

(3) 安息角测定方法
当散状物料从一定高度均匀地、定点地自由落下后，物料沉堆积表面下滑形成料堆，由水平面与

料堆的斜坡面所构成的角度 a_0 即为安息角。常用物料安息角等级与数值如表4。

表4 常用物料安息角等级与数值

序号	流动性	安息角 a_0	典型物料
1	极易自由流动	$< 20^\circ$	各类光滑粒状
2	自由流动	$20^\circ \leq a_0 \leq 30^\circ$	细盐、磷肥、干硅藻土、矾土
3	一般流动	$30^\circ < a_0 < 45^\circ$	铅、铁、锰矿、石膏、石灰石、煤等大部分物料
4	粘滞	$\geq 45^\circ$	炭黑、各类粉状、含水类物料

从表4也可看出小于 20° 的安息角，流动性极佳。

图4、图5显示不同安息角的堆积状况。

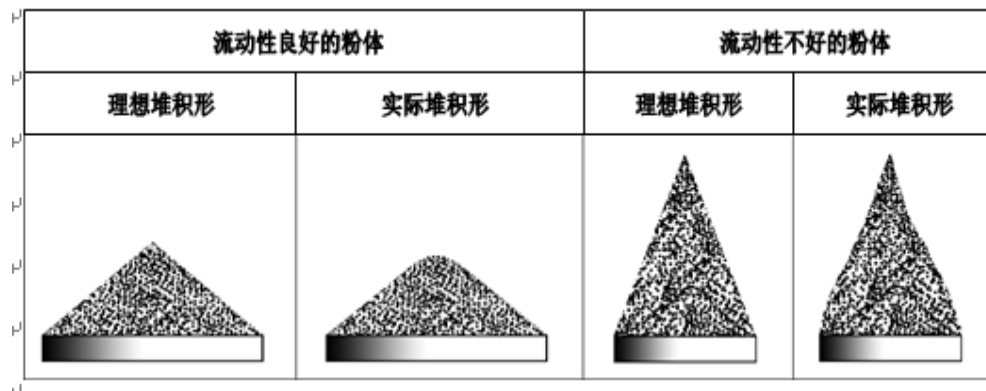


图4 安息角测试过程示意图

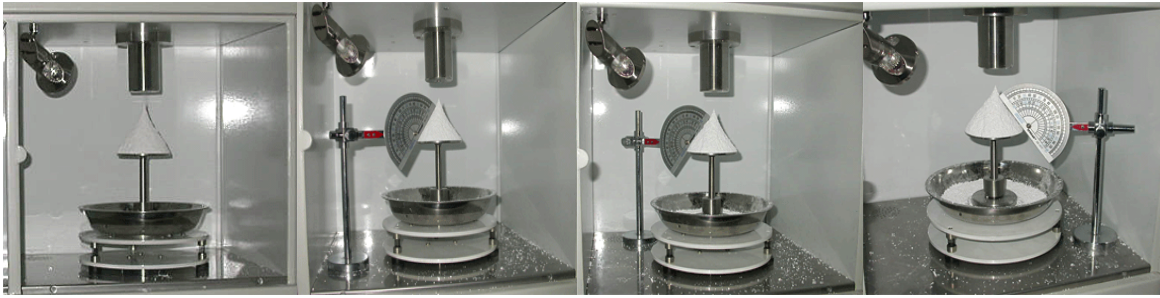


图5 安息角测试过程示意图

(4) 内摩擦角测定方法

内摩擦角的测定是在安息，角为 a_0 的料堆中间，用小铲将中部物料由下向上铲去后，中部新的料堆倾斜面与水平面所构成的角度 ϕ_i 即为内摩擦角。

但物料流动性较好时，安息角与内摩擦角是相等的，即 $a_0 = \phi_i$ 。对于具有粘性的物料，内摩擦角小于安息角，即 $a_0 > \phi_i$ 。

内摩擦角的测定可判断出该物料的粘滞特性。

(5) 外摩擦角测定方法

① 静态外摩擦角测定。将散状物料自然堆积在平面OA上，OA平面绕O轴缓慢抬起，抬至某一角度时，物料开始在平面上滑动，此时构成的 $\angle AOB$ 即为外摩擦角。由于OA平面是缓慢的(基本上是静止状态)转动的，因此 ϕ_e 称为静态外摩擦角(相应的

摩擦系数称为静态摩擦系数)。

② 动态外摩擦角测定。若OA平面绕O轴抬起时加以振动，则物料移动时的外摩擦角称为动态外摩擦角(相应的摩擦系数称为动态摩擦系数)。从试验数据可知，动态外摩擦角小于静态外摩擦角。所以在工程中常采用各种振动设备来保证物料输送时顺利通过溜管、溜槽。

外摩擦角大小反映出物料在料斗内流动的阻力。

(6) 流动性测定方法

① 流动指数测定。散状物料流动性的测定及表示方法可根据溜槽的倾角(保证自由流动条件下)而划分其流动性,并以“流动指数”来表示(见表5)。

表5 流动指数

物料的流动性	流动指数	自由流动时溜槽倾角(°)	物料自然堆积角(°)
流动性极好(似水流)	25	10~25	1~15
易流动	45	30~45	20~35
不易流动	60	50~60	40~50
难流动	90	90	65~80

② 卡尔指数测定。卡尔(Carr)流动指数是根据散装物料的安息角、压缩率、内摩擦角、均匀度和凝聚度四项分指数来综合评定固体散料的流动特性,从而最终确定卡尔流动总指数。

除了上述物料粒度、密度、安息角、内摩擦角、外摩擦角、流动性指标外,物料空隙率、压缩率、物料硬度、极限含水率、侧压力系数等指标亦至关重要。为了使自动衡器产品能适应不同的需

求,特别是粉体物料计量产品开发人员,必须全面了解物料的特性和试验方法。

3 不同物料性能对称量准确度的影响^[2]

3.1 物料粒度影响

首先,在OIML R61《重力式自动装料衡器》^[5]的准确度评定中,明确将物料的颗粒质量的大小与准确度挂钩。具体规定如下:“当参考颗粒质量超过使用中检验每次装料的最大允许偏差(MPD)的0.1

倍时，从MPD表得出的数值应加上参考颗粒质量的1.5倍。但是，MPD的最大值不应超过等级指定因子（ \times ）乘以9%。”由此可见，随着物料颗粒质量的增大，相应的MPD也随之应进行修正。我国的重力式自动装料衡器国家标准和检定规程中根据国际建议的规定也明确在无法确定被称物料时，不允许在产品铭牌中标注产品的准确度等级。

其次，在工业自动衡器被称物料输送通过称量单元时，如果粒度尺寸过大时，将会带来物料流动的受阻，并可能引起搭桥等现象，从而影响到称量的准确度。

3.2 物料密度影响

在重力式自动装料衡器中，物料的密度测定与计量料斗的容积、称量的准确度相关。例如，对于一些低密度发泡类且外形不规则的物料，宜采用多头电脑组合秤通过多称量单元的选择组合来实现精确计量。目前，多头电脑组合秤在国内外的食品行业已经广泛采用。

3.3 物料安息角影响

作为物料特性的一个重要指标，散状物料的安息角测定，与重力式自动装料衡器的计量料斗的容积确定、连续累计自动衡器的输送皮带的横截面积，以及所有自动衡器的物料流动特性与输送流量大小及流量恒定密切相关。

3.4 物料内摩擦角影响

因为内摩擦角的测定，可判断出该物料的粘滞特性。因此在重力式自动装料衡器中，物料内摩擦角决定物料的定量准确度。

3.5 物料外摩擦角影响

重力式自动装料衡器的料斗结构设计中，因为物料外摩擦角大小反映出物料在料斗内流动阻力，决定物料的流动特性。

3.6 流动特性影响

固体散料的流动特性，直接反映了各种自动衡器的计量速度。

4 称重系统针对不同物性技术措施的典型案例介绍

由于上述物料物理特性参数在称重过程中对称重准确度的影响，因此在系统结构设计中应该针对不同的物理特性采取不同的结构设计措施。

案例1 一种针对被称物为各类粉体物料的安息角，通常为 30° 的多头智能组合秤，见图6。为保证包装速度和称量准确度，考虑物料的流动特性，在产品结构设计时采取了特殊的技术措施：给料振动盘采用了U形弧度的粉体专用振动盘；上下承载器采用了粉体专用防漏型；机架和溜槽采用了专用的 55° 下料角度；整个称重单元采用了密封门开启形式。

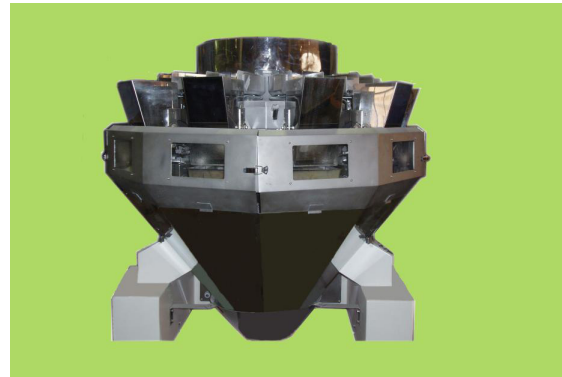


图6 粉体物料计量用智能组合秤外观图^[3]

案例2 一种针对食品行业的被称物为粘性潮湿物料的重力式杯式自动电子计量机，见图7。上下承载器之间采用了具有专利设计的水平抽板形式，被称物落下时，在下抽板关闭前，上方抽板开始同向运动，并采用专用的料斗壁的结构设计，使粘性和潮湿的被称物能够快速而准确的计量。



图7 粘性物料计量用杯式自动电子计量机外观图^[4]

案例3 一种针对橡胶行业的被称物为炭黑粉料的炭黑秤，见图8。在结构设计中的称重料斗采用了特种聚酯防粘布材料，另外，在布斗壁上还配置了

仓壁振动器。



图8 橡胶行业炭黑粉料计量用炭黑秤外观图^[3]

案例4 一种冶金行业的矿石原料称重料斗秤。在产品结构设计中，储料斗、计量料斗的物料流动所经过的料斗壁必须覆盖一层厚厚的耐磨铸铁材料，用以防止矿石对金属料斗壁的冲击磨损，从而影响料斗秤的使用寿命。在特殊原料的各种重力式装料衡器（包括自动、非自动衡器）中，为了防止物料长期与料斗壁接触造成金属材料磨琢，一般还常在料斗壁上喷涂一层耐磨的特氟龙材料。

案例5 一种针对化工行业粘性物料的属于连续累计自动衡器的电子定量皮带秤。采用了链板式皮带输送机。有效地解决了物料在输送、称重过程中粘性物料的流动性问题。

案例6 同样作为连续累计自动衡器的螺旋秤、失重秤等产品中的螺旋输送及称重单元结构设计。由于受物料特性的影响，在螺旋结构设计中必须根据不同的粉体或颗粒物料特性设计不同螺距、不同螺旋升角和不同的轴径、筒径。笔者曾在日本大和製衡株式会社本部学习工业衡器技术时，在公司物料实验室中见过品种繁多的不同规格、不同结构大大小小的螺旋装置，其目的就是为不同的客户制定个性化的技术措施。

案例7 在重力式自动装料衡器中，料位开关的选择至关重要。目前市场上粉体料位开关的产品主要有阻旋式料位开关、振动式料位开关、电容式料

位开关、射频导纳式料位开关。例如：物料细度和密度较低时，不能选用阻旋式料位开关。如果物料吸湿性和流动性较差，建议选用射频导纳式料位开关等。在实际应用上应根据不同的物料特性选择不同料位开关形式。

综上所述的各种案例分析中，可以看出不同物料的物理特性应采取不同的结构设计措施的重要性。

5 结语

本文从介绍工业衡器称重过程中有关的各种固体、粉体散料的几个主要特性指标的分析和测试方法，引申到不同用途的工业衡器产品应针对不同的被称物料特性采取不同的技术措施，以期引起工业衡器产品设计同行的重视。

参考文献

- [1] 邱美生，许向明. 化工粉体物料物性汇编[M]. 南京：中国石化金陵分公司研究院，2001.
- [2] 陈日兴. 衡器整机装配调试工（高级）[M]. 北京：中国劳动社会保障出版社，2015.
- [3] 上海大和衡器公司产品样本.
- [4] 安立工业自动化（上海）有限公司产品样本.
- [5] OIML R61 《Automatic gravimetric filling instrument（重力式自动装料衡器）》国际建议[S].

作者简介

陈日兴（1946—），男，享受国务院颁发政府特殊津贴工程技术类专家。原任上海大和衡器有限公司总工程师，现任《衡器》杂志编委会副主任委员、中国衡器协会发展战略咨询委员会委员、中国衡器协会专家技术委员会顾问、中国衡器协会团体标准技术委员会顾问。2019年荣获中共中央、国务院、中央军委联合表彰颁发的国庆70周年纪念奖章。研究方向：衡器产品研发与标准、计量。国内、外发表技术论文110余篇。