

# 自动衡器系统物料特性分析试验与准确度开放性

## ——自动衡器结构最新设计方法研讨之一

上海大和衡器有限公司 陈日兴

摘要: 本文从自动衡器常用物料特性分析与试验方法出发, 阐述了被称物料特性与自动衡器的计量特性关系, 从而验证了自动衡器准确度开放性的含义。

关键词: 自动衡器、物料特性、回归分析、准确度开放性

### 前言

在人们的习惯思维中, 一台衡器制作完成, 经过厂内检验, 该衡器的准确度等级就应该是确定无疑的了。但是在自动衡器的实际应用和一些自动衡器的最新国际建议, 诸如 OIMLR61 的文本中, 往往给出的是一种开放性的准确度指标。由于被称物料特性与衡器的准确度息息相关, 因此深入研究被称物料特性与物料试验, 从而找出最合理的设计方案, 是提高自动衡器的准确度的最有效的途径之一。从另一个角度看, 在现场使用的自动装料衡器, 如果被称物料变化, 则需要重新确定准确度等级, 已成为不争的事实。本文仅就物料特性分析与试验方法的论述, 阐明物料特性与自动衡器的关系, 以期引起衡器同行的注意。

#### 1. 被称物料特性及测定方法

影响自动衡器动态控制精度的三要素为: 速度、准确度与稳定度。自动衡器的被称物料特性又直接与之有关。下面就物料的几个主要特性指标的分析来看其重要性。

##### (1) 物料粒度

###### 1) 粒度

粒度是指固体散料颗粒(或物料块)的尺寸大小。

一般粒度按标准块尺寸  $a'$  确定:

对于已经分选的材料:  $a' = 1/2 (a_{max} + a_{min})$

上式中:  $a_{max}$ ——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,  $a' = a_{max}$ , 或  $a' = 0.8a_{max}$ ,

物料粒度的分类如下表:

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

## 2) 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）。

## 3) 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。

## 4) 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  $5\mu\text{m}\sim 125\text{mm}$ 。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。

以下举例说明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 ( $\mu\text{m}$ )	d(mm)	m(目)	$\alpha$ (%)	a ( $\mu\text{m}$ )	d(mm)	m(目)	$\alpha$ (%)	a ( $\mu\text{m}$ )	d(mm)	m(目)	$\alpha$ (%)
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( $\mu\text{m}$ )；d——筛丝直径(mm)；m——网目（1英寸长度上的孔数，目）； $\alpha$ ——空隙率（筛子的有效面积百分数，%）。

首先，在 OIMLR61《重力式自动装料衡器》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(x)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。

其次，物料粒度尺寸过大，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。

## (2) 物料密度

### 1) 定义

一般来说物料密度可分为真密度和堆积密度(又称容积密度)。

真密度  $\rho$ ——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料斗设计中，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：

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

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  $1 \text{ t/m}^3$ ，则中、小块物料的堆积密度是  $0.9 \text{ t/m}^3$ ，粒状物料则为  $0.8 \text{ t/m}^3$ ，粉状物料为  $0.7 \text{ t/m}^3$ 。

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列式计算：

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

式中： $\rho_m$ ——压实状态的堆积密度， $\text{t/m}^3$ ；

$K_m$ ——物料堆积密实系数，一般 $K_m=1.05-1.2$ ；

$\rho_0$ ——自然堆积时的堆积密度， $\text{t/m}^3$ 。

## 2) 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。

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。

## (3) 安息角

### 1) 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。

### 2) 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 $\alpha_0$ 即为安息角。常用物料安息角等级与数值如下表：

序号	流动性	安息角 $\alpha_0$	典型物料
1	极易自由流动	$< 20^\circ$	各类光滑粒状
2	自由流动	$20^\circ \leq \alpha_0 \leq 30^\circ$	细盐、磷肥、干硅藻土、矾土
3	一般流动	$30^\circ < \alpha_0 < 45^\circ$	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

作为物料特性的一个重要指标，散状物料的安息角测定，与计量料斗的容积确定、输送皮带的横截面积，以及自动衡器的流动特性进而与输送流量有关。从上表也可看出小于  $20^\circ$  的安息角，流动性极佳。

#### (4) 内摩擦角

##### 1) 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

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

上式中： $f_i$ ——内摩擦系数

$\Phi_i$ ——内摩擦角 ( $^\circ$ )

##### 2) 测定方法

内摩擦角的测定是在安息角为  $\alpha_0$  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  $\Phi_i$  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  $\alpha_0 = \Phi_i$ 。对于具有粘性的物料，内摩擦角小于安息角，即  $\alpha_0 > \Phi_i$ 。

内摩擦角的测定，可判断出该物料的粘滞特性。

#### (5) 外摩擦角

##### 1) 定义

外摩擦角是固体散料与其它材料如器壁面之间形成的摩擦角。表示散状物料与其它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：

$$F_e = \operatorname{tg} \Phi_e$$

上式中： $f_e$ ——外摩擦系数；

$\Phi_e$ ——外摩擦角 ( $^\circ$ )。

##### 2) 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  $\varphi_e$  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)。从实验数据可知，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。

外摩擦角的大小反映出，物料在料斗内流动的阻力。

### (6) 流动性

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

#### 1) 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。

#### 2) 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。

#### 3) 均匀度 $U_f$

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。

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

上式中： $X_{60}$ ——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。

#### 4) 凝聚度 $Ch$

凝聚度是指粉状的固体散料颗粒表面的表观粘结能力。

#### 5) 分散度 $D_s$

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。

#### 6) 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（见下表）。

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。

固体散料的流动特性直接反映了自动衡器的计量速度。

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。

### 2. 物料特性试验的回归分析

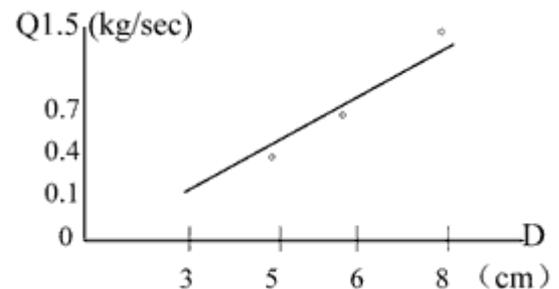
在自动衡器的产品开发中，为了满足不同被计量物料的计量准确的要求，被称物料特性的试验是必不可少的，而实验数据的回归分析又是各种变量数据之间相关分析的最好的方法之一。

#### (1) 一元线性回归

对于有一定联系的两个变量 $x$ 、 $y$ ，在观察或试验中得到若干对数据  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ……， $(x_n, y_n)$ 的基础上， $x$ 、 $y$ 之间大致成线性关系： $\hat{y} = a + bx$ ，此关系式称为一元线性回归方程。

例如：我们在设计重力式自动装料秤的计量斗出料口  $D$  大小时，当已知物料的密度、粒度时，必须通过实物试验来找出出料口大小与物料输送流量  $Q$  的“相关关系”，试验中可实测到一组数据如下：

	D (cm)	Q(kg/sec)
1	3	0.090
2	5	0.424
3	6	0.707
4	8	1.581



上右图中 4 组数据分布在直角坐标平面上的四点，可以看出：总归能找到一根直线，使该直线最接近四点。于是这直线在轴上的截距就是所求的  $a$ ，它的斜率就是所求的  $b$ 。

#### (2) 最小二乘法

在一组自变量、应变量数据组  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ……， $(x_n, y_n)$ 中要找出一个已知类型函数： $y=f(x)$ [例如线性函数： $y=a+bx$ ，或 $y=ax^b$ ]，使得偏差平方之和

$\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2$  为最小，即为最小二乘法。

1) 相关系数:

随机变量 $x_i$ 和 $y_i$ 之间线性联系程度大小的量, 称为相关系数 $r$ 。

$$0 \leq |r| \leq 1$$

当 $x_i$ 和 $y_i$ 线性联系程度大时,  $|r|$ 越接近 1;

当 $ax_i+by_i=c$ 时,  $|r|=1$ ;

当 $x_i$ 和 $y_i$ 同向时,  $r$ 值为正值, 反之为负值。

相关系数  $r$  的计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{其中 } \bar{x}, \bar{y} \text{ 为 } \{x_i\}, \{y_i\} \text{ 的算术平均值}$$

现就应用最小二乘法对自变量、应变量数据进行求解:

2) 线性类型经验公式

线性类型: 一组自变量、应变量数据呈线性关系, 数学表达式如下:

$$\hat{y} = a + bx \dots \dots \dots (2)$$

在平面中设给定的 $n$ 个点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , 总有一条直线 $l$ 使所有的点最接近。而二元函数 $Q(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$  定量描述了直线 $l$ 跟这 $n$ 个点的总的远近程度。

利用微积分学中的极值原理, 解二元一次联立方程,

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] x_i = 0 \end{cases}$$

从上述计算可以证明:

$$a = \bar{y} - b \bar{x}, \quad (2-1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{其中 } b \text{ 为回归系数。} \quad (2-2)$$

由 (2-1)、(2-2) 确定的 a、b 确实可使平方和达到最小。对于经验公式是线性的情况下，可直接应用 (2-1)、(2-2) 求得  $\hat{y}=a+bx$  中的 a、b 值。

### 3) 非线性类型经验公式之一

对于线性类问题可直接用上述 (2) 求解。而在实际上大量的试验数据不属于线性问题，一个常用的方法就是把非线性类型转化为线性问题。

非线性类型：一组自变量、应变量数据呈非线性关系，数学表达式如下：

$$\hat{y} = A * e^{-B/x} \quad (B>0) \dots\dots\dots(3)$$

通过试验数据求未知数 A、B

上式中：两边取对数得  $\ln Y = \ln A - B/X$

上式中令：  $Y^* = \ln Y$

$X^* = 1/X$

$$\text{则： } Y^* = \ln A - BX^* \dots\dots\dots(3-1)$$

这样从 n 组  $(x_1, y_1) (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$  试验数据出发：

假设  $x_i^* = 1/x_i, y_i^* = \ln y_i (i=1, 2n)$

得到： n 组  $(x_1^*, y_1^*) (x_2^*, y_2^*) \dots (x_n^*, y_n^*)$  数据。

再用线性类型经验公式 (2)  $\hat{y} = a + bx$  中令  $a = a^*, b = b^*$

由公式 (2-1)、(2-2) 可求得  $a^*, b^*$

再从 (3-1)  $Y^* = \ln A - BX^*$  中，由  $\ln A = a^*, -B = b^*$ ，可求得 A、B 值。

### 4) 非线性类型经验公式之二

$$\hat{y} = A * X^B \quad (B>0) \dots\dots\dots(4)$$

上式中：两边取对数得  $\lg Y = \lg A + B \lg X$

上式中令：  $Y^* = \lg Y$

$X^* = \lg X$

$$\text{则： } Y^* = \ln A + BX^* \dots\dots\dots (4-1)$$

再用线性类型经验公式 (2)  $\hat{y} = a + bx$  中令  $a = a^*, b = b^*$

由公式 (2-1)、(2-2) 可求得  $a^*, b^*$

再从(4-1) $Y^*=InA+BX^*$ 中, 由  $InA=a^*$ ,  $B=b^*$ , 可求得 A、B 值。

结论: 根据经验, 一般物料特性试验中料斗开口大小与物料流量呈非线性关系, 可采用上述最小二乘法经验公式 (3) 或 (4), 求出物料特性关系式。再根据所要求的不同流量可以选择不同的料斗开口大小。

### (3) 物料特性试验举例说明

已知: 物料PVC粉料微粒, 密度  $0.578t/m^3$ , 粒度 0.1mm, 物料实际流量测试数据如下:

**D-Q 实际测试表**

试验次数	料斗开口直径 D (cm)			
	3	4	5	6
1	1.30 kg	1.28 kg	2.07 kg	2.97 kg
2	1.27 kg	1.29 kg	2.14 kg	3.12 kg
3	1.27 kg	1.26 kg	2.05 kg	3.06 kg
4	1.25 kg	1.29 kg	2.12 kg	2.95 kg
5	1.27 kg	1.29 kg	2.13 kg	3.07 kg
测定时间 (s)	10.00	5.00	5.00	5.00
Q (kg/sec)	0.13	0.26	0.42	0.61

在重力式自动装料衡器的设计中, 假设物料特性料斗开口大小D(cm), 物料流量Q(kg/s)两者呈非线性关系如下:  $Q=A \cdot D^B$ , 根据 4 组  $(D_1, Q_1)$ ,  $(D_2, Q_2)$ ,  $(D_3, Q_3)$ ,  $(D_4, Q_4)$  试验数据, 采用上述非线性类型经验公式 (4) 和 (4-1) 的方法, 可求得A、B值。经计算Q、D关系式如下:

$$Q=0.0108560 \times D^{2.26} \dots\dots\dots(5)$$

根据上述相关系数公式计算出: 相关系数  $r=0.9991460$ ,  $|r|$ 很接近 1, 说明 Q、D 两个变量线性联系程度大。

从上述 PVC 粉料微粒的试验中得到了该特定物料的料斗开口大小 D(cm)与物料流量 Q(kg/s)的经验公式。不同的物料其密度、粒度与流动性等性能指标不同, 所以经验公式也不尽相同, 每次物料都应进行物料特性测试, 并求得该物料得经验公式。这样为设计流量选型与结构开度尺寸提供了第一手资料。

### 3. 物料特性与准确度等级的开放性

根据上述物料特性分析与试验, 可以认为自动衡器由于被称物料流动特性的不同, 决定了准确度等级的不同。国际法制计量组织发布的 OIMLR61 《重力式自动装料衡器》明确规定“装料衡器应具备要称量的物料标示”, “装料衡器标志上的物料、等级或工作参数要明确与相应的物料一致”, “被称量物料改变后, 装料衡器要进行检定。对于不同的物料, 与之对应的等级也不同, 或者是需要采用不同的工作参数以保证其误差范围。”再从连续累计自动

衡器（皮带秤）和非连续累计自动衡器（累计料斗秤）等自动衡器中被称散装物料的准确度评定来看，也都与物料特性密切相关。

上述要求都明确提供了一个信息：就是自动衡器的准确度是随着被称量物料的改变而改变的。例如，一台最大秤量为 25kg 的重力式自动装料秤，当被计量物料为氯化钾粒子时，可达到 X(0.2)级，但被计量物改为磷酸钠片状物时，准确度却为 X(0.5)级。笔者近年来多次听到，一些自动衡器的制造企业在申请计量器具制造许可证的时候，遇到了麻烦，技术监督机构一定要求生产厂商在产品铭牌上明确写上准确度等级，而不关心其计量的物料特性。笔者近来也多次观察到我国进口的一些自动衡器的实物产品与铭牌，发现大部分都没有明确标示准确度等级，即使标了准确度也会发现附加的条件。究其原因就是自动衡器的开放性原则在国际上已得到了广泛的认知度。

在目前自动衡器日益发展的今天，要实现自动计量的三大要素：高速度、高准确度、高稳定度，物料特性参数设计是必不可少的。本文的目的就是要唤起衡器同行们对于物料特性的高度关注。

#### 参考文献：

- [1]化工粉体物料物性汇编 邱美生等〔M〕中石化金陵分公司研究院 2001 年
- [2]概率统计讲义 北京大学陈家鼎等〔M〕人民教育出版社 1980
- [3]机械化运输工艺设计手册 应美珩等〔M〕化学工业出版社 1998 年
- [4]OIML TC9/SC2 International Recommendation 《OIMLR61-1/-2: Automatic gravimetric filling weighing instrument》〔S〕Edition 1996/2004 (E)

作者：陈日兴，上海大和衡器有限公司，技术开发部部长，享受国务院政府特殊津贴专家。

发表论文近 60 篇，研究方向：产品开发与计量技术。

通讯地址：上海市浦东新区庆达路 368 号，上海大和衡器有限公司 邮编：201201

Tel: 021-58975205

Email: crx8030@sina.com