

## 工程说明：EN0077 用于批次处理系统的湿度控制方法

摘要：概述批次处理系统中的湿度控制方法

受影响的产品：所有产品

修订日期：15/10/2024 作者：S.Cook

---

## 1 摘要

本工程说明介绍用于批次处理系统的湿度控制方法。批次处理系统通常由多个原料筒仓或料斗以及混合这些物料以形成最终产品的搅拌机组成。

本工程说明自始至终使用国际单位系统。它也假定水的比重为 1。它不考虑在不同温度下水的比重变化，因为该变化可以忽略不计。

## 2 筒仓和料斗

配方通常按物料的干重制定。在实践中，物料含有水分是相当普遍的。这会影响物料的重量及其体积密度。体积密度的这种改变是由于颗粒本身膨胀（如种子谷物）或物料改变其表面张力（如某一含水量下聚集在一起的沙子）。

### 2.1 按体积进行批次处理

由于湿度引起的体积变化难以测量，通常是非线性的，因此基于湿度的相关正确调整是非常难以实现的。Hydronix 建议应由称重系统替换体积系统。

### 2.2 按重量进行批次处理

由湿度引起的重量变化是线性变化。虽然水的比重确实随温度变化，但对于所有实际意图和目的来说，可以将其视为常量 1。这有助于简化控制过程，因为 1L 水可以被视为 1kg。

示例：

物料重量 1,000kg

含水量 = 10%

$1,000 \times 0.1 = 100\text{kg 水}$

水的比重 @ 0° C（参考温度 20° C）= 1.002

$100\text{kg} / 1.002 = 99.8\text{L}$

水的比重 @ 37.8° C（参考温度 20° C）= 0.995

$100\text{kg} / 0.995 = 100.5\text{L}$

这个变化小于工业重量批次处理系统的可实现精度，所以本说明的其余部分将假定水的比重为 1。它也将假定所有物料数据均会参照此假设。

为了使重量批次处理系统能够高效精确地称重物料，首先必须进给大量物料，称为主物料进给，称重已进给物料，然后通过一系列精细进给更慢地添加其余所需物料。精细进给就是打开门一小段时间，允许少量物料通过，然后关闭门。在每次精细给料之后称重物料，直到添加所需的物料数量。

湿度控制可以集成到该过程中，而无需增加整体批次处理时间。最后精细给料前可以调整最终重量目标。这取决于物料中的预期湿度变化。主要剂量应设置为小于物料的湿度范围。由于在此点的称重不够精确，因此最好在该值添加 5% 的公差以说明目标的任何过量或欠量。

**示例：**

*最干预期湿度 = 3%*

*最湿预期湿度 = 18%*

*公差 = 5%*

*湿度范围 = 18 - 3 = 15%*

*主要剂量 = 100 - 15 - 5 = 80%*

在主要剂量期间，平均传感器的湿度测量非常重要。在批次处理过程中，湿度会有所不同，补偿应基于整体湿度，而非批次处理结束时的任何单一读数。

应使用 Hydronix 传感器提供的平均/保持功能进行求平均值操作。这消除了模拟回路上读取传感器输出，电缆噪音或模拟卡输入分辨率等输出时可能出现的任何错误。

可以通过将数字输入发送到传感器或 RS485 连接来使用传感器中的求平均值。

在主要剂量之后，保持平均值，可以从传感器获得，并且调整最终重量目标。要计算需要称重的物料的实际重量，应使用下面的公式：

$$T = T_d(100\% + M\%)$$

**图 1：湿重计算**

其中：

T = 要添加的物料的总重量

T<sub>d</sub> = 批次处理所需物料的干重

M = 物料的湿度（NB: 100% = 1, M% = 湿度/100）

**示例：**

*物料的目标干重 = 1,000kg*

*主要剂量 = 80%*

*主要剂量目标 = 1,000 x 0.8 = 800kg*

*实际主要剂量重量 = 780kg（允许一些称重错误）*

*平均湿度 = 10%*

*最终目标 = 1,000 x (100%+10%) = 1,000 x (1 + 0.1) = 1,100 kg*

## 2.2.1 控制过程

对于料斗/筒仓只能容纳一种物料的系统，建议将校准保存在传感器中，并将传感器的输出设置为平均湿度。对于可能在不同时间容纳多种物料的系统，建议将传感器的输出设置为平均非标定值。校准必须在控制系统中完成。

**将传感器配置为输出湿度的料斗/筒仓批次处理过程的伪码。**

1. 将主要剂量目标设置为允许过量加湿度变化的最终目标的百分比（注意：在上面的示例中，这为 80%）。
2. 打开料斗/筒仓门。
3. 通过激活数字输入或通过 RS485 发送开始求平均值命令，开始在传感器中求平均值。
4. 当称重设备小于目标时，保持门打开，直至达到目标。
5. 通过断开数字输入或通过 RS485 发送停止求平均值命令，停止求平均值。
6. 关闭料斗/筒仓门。
7. 获取从传感器读取的平均湿度，并使用图 1 中的公式计算最终目标重量。
8. 虽然称重设备小于最终目标，打开并关闭门一小段时间（精细给料），直到最终目标在可接受的公差范围内。

对于必须保留多次校准的系统，必须根据非标定值计算湿度。这很简单，因为从传感器到湿度添加的响应是线性的。

$$\text{Moisture \%} = B \cdot \text{Unscaled} + C - D$$

**图 2：从非标定值计算湿度**

其中：

B = 每次湿度 % 变化的非标定值变化（变化率）

C = 偏移（湿度 = 0 时的理论非标定值）

D = 吸收值

**注意：只有在显示自由湿度（而非总湿度）时才需要 D 值，否则可以将其设置为 0。**

## 2.2.2 物料校准

在物料校准过程中，应在整个物料工作范围内收集几个点的物料含水量和该湿度的非标定值。物料的工作范围介于生产过程中物料的最低湿度和最高湿度之间。建议在工作范围内至少有 3 个点。Hydronix 传感器不能用于测量低于物料吸水值的湿度，因此建议将物料保持在此值以上。

**示例：**

沙子的吸水值为 1.5%，饱和度为 16%。

在生产过程中，沙子含水量将保持在 2% 以上，而在该过程中添加过多水分会导致含水量超过 8%。

因此，工作范围为 2-8%。

应收集沙子的样品，含水量约为 2%、5% 和 8%。

要从多个点计算 B 和 C 值，虽然有很多方法，但使用线性最小二乘回归法可能是最常见的方法。这是 Hydronix 建议的方法。

$$B = \frac{\sum \text{湿度值} \cdot \text{非标定值} - \left( \frac{\sum \text{湿度值} \cdot \sum \text{非标定值}}{\text{点数}} \right)}{\sum \text{非标定值}^2 - \left( \frac{\sum \text{非标定值} \cdot \sum \text{非标定值}}{\text{点数}} \right)}$$

图 3: B 值的计算

$$C = \frac{\sum \text{湿度值} - B \cdot \sum \text{非标定值}}{\text{点数}}$$

图 4: C 值的计算

示例

非标定值	湿度
20	2
30	5
40	8

$$B = \left( \frac{(20 \cdot 2) + (30 \cdot 5) + (40 \cdot 8)}{3} - \left( \frac{(2+5+8) \cdot (20+30+40)}{3} \right) \right) / \left( \frac{(20^2+30^2+40^2)}{3} - \left( \frac{(20+30+40) \cdot (20+30+40)}{3} \right) \right)$$

$$B = (510 - (15 \cdot 90 / 3)) / ((400+900+1600) - (90 \cdot 90/3))$$

$$B = 60 / (2900 - 2700)$$

$$B = 60 / 200$$

$$B = 0.3$$

$$C = ((2+5+8) - 0.3 \cdot (20+30+40)) / 3$$

$$C = (15 - 27) / 3$$

$$C = -4$$

### 3 搅拌机

搅拌机中的湿度控制通常包括将水添加至目标值。这可以使用计算方法或滴定方法完成。计算方法涉及测量物料湿度，然后计算一剂的加水量。

计算方法要求准确的物料干重。

滴定方法对不准确的干重弹性更大，但比计算方法更慢。

滴定方法需要提供一致的水压。

本文档涵盖了每种方法所涉及的控制过程。有关每种方法用法的更多介绍，请参见 HD1048 的第 4 章和第 5 章“Hydro-Control (HC07) 操作员指南”。

在 HD1048 中，计算模式被称为“CALC”模式。滴定方法被称为“AUTO”模式。

重要的是要注意，搅拌不同于料斗和筒仓，通常一次只能容纳一种物料，涉及将物料混合在一起。

只要组成物料保持相同的比例，并且允许足够的时间搅拌在一起使其变得均匀，则物料的混合可以被视为一种物料。根据工业类型，物料的混合通常被称为配方。它们本质上是一回事。

搅拌周期将包括：

1. 添加物料
2. 将物料混合在一起，直到达到稳定的信号
3. 加水
4. 将物料和水混合，直到达到稳定的信号
5. 出料

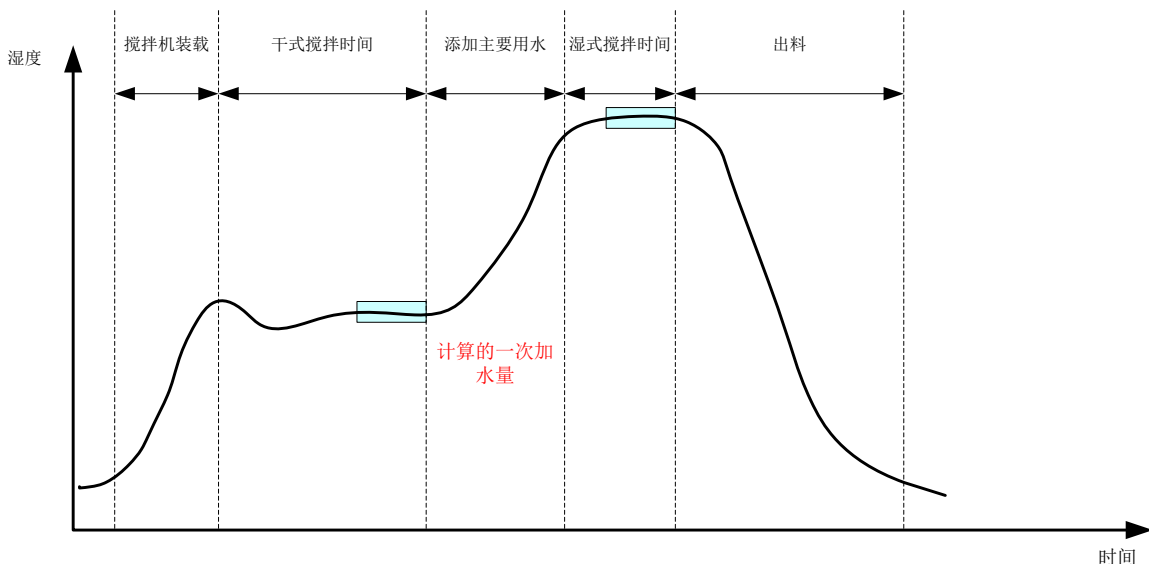


图 5 - 搅拌周期

如果需要在不同的阶段添加不同的物料，或者添加物料（如金属）会对传感器信号产生不利影响，则可能需要重复步骤 2-4。

### 3.1 执行计算方法

要计算从传感器添加非标定值的应使用的水量。为了进行计算，必须允许操作员使用手动方法，可以根据配方设计和操作员对进入物料的含水量的了解添加预定的水量。这将允许操作员创建参考搅拌。图 6 显示了参考搅拌的过程

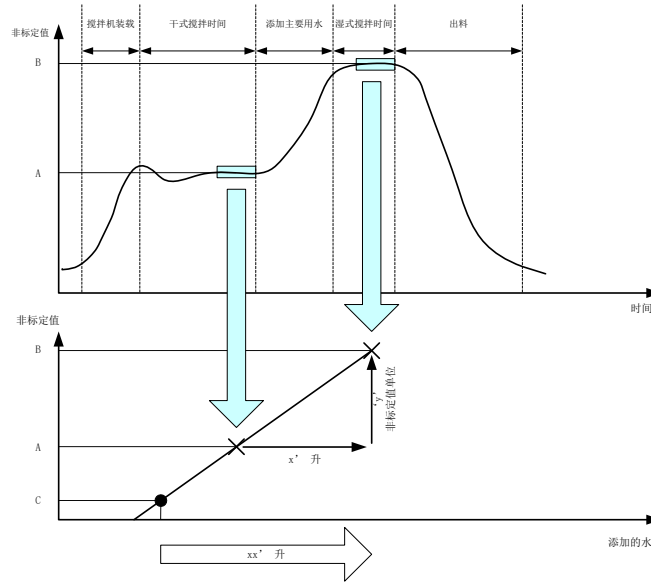


图 6: 来自搅拌周期的校准点

在干式搅拌时间和湿式搅拌时间结束时获得稳定的测量。建议来自传感器的信号平均至少五秒。

每个湿度增加单位的非标定值变化（变化率图）可以如图 7 所示进行计算。

$$B = \frac{100 \cdot \text{水}}{\text{干重} \left( \text{非标定值}_{\text{湿}} - \text{非标定值}_{\text{干}} \right)}$$

**N.B:** 值 100 是允许 B 值在图 2 的公式中使用的比例因子

图 7: 计算加水变化率

应该注意的是，干重是添加的所有物料的总干重，不包括水和已进入物料中的任何水分。

在配方中，应记录湿式搅拌值和 B 值，以便在生产过程中使用。要计算添加到干式配方中的水量，可以使用图 8 中的公式。

$$\text{所需的水} = \frac{\text{干重} \cdot B \cdot \left( \text{非标定值}_{\text{目标}} - \text{非标定值}_{\text{当前}} \right)}{100}$$

**注意:** 值 100 是允许 B 值在图 2 的公式中使用的比例因子

图 8: 计算搅拌过程中所需的水

要计算湿度值，必须应用偏移。计算偏移需要用户规定最终湿度值。这可以通过对成品进行实验室测试获得，或者如果这是不可能的（如在化学反应开始将水转换为另一种物质的混凝土生产中），则可以使用图 9 计算含水量。

$$\%最终湿度 = \frac{100 \text{ (原料中的水 + 搅拌过程中添加的水)}}{\text{物料的总干重}}$$

**图 9: 计算产品的最终湿度**

要将传感器的非标定值转换为含水量以进行显示，必须如图 10 所示计算偏移。

$$C = \text{湿度}_{\text{目标}} - \text{非标定值}_{\text{目标}} \cdot B$$

**图 10: 计算校准的偏移**

然后，可以使用图 2 中的公式显示湿度。

### 3.2 执行滴定方法

滴定方法的最有效形式包括改变水流速，使得在加水开始时流速高，并且随着配方的湿度水平接近目标湿度，降低流速以免超出目标。最常见的做法是实施比例积分微分控制器（PID 控制器）。大多数 PLC 系统都有内置功能块的 PID 控制器。

有关 PID 控制器的完整介绍，请参见 HD1048 第 9 章第 3.3 节。

如果搅拌机系统具有比例阀，则操作相对简单。系统应存储比例增益值、积分增益值和导数增益值。由于搅拌系统无法从过量（过多水分）恢复，因此导数值应设置为 0。

可以使用下面的公式计算比例阀的控制输出。

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

其中

$K_p$ : 比例增益，调整参数

$K_i$ : 积分增益，调整参数

$K_d$ : 导数增益，调整参数

$e$ : 错误 = 目标值（非标定值） - 当前值（非标定值）

$t$ : 时间或瞬时时间（现在）

$\tau$ : 集成变量：需要从时间 0 到现在的值  $t$ 。

$MV(t)$  = 调节变量（或控制输出）。如果是阀门，这会限制在 0-100。

本质上，比例部分是一个简单的错误比率，因此错误越大，响应越大。积分部分是随时间的错误之和。错误存在的时间越长，对错误的响应越大。导数部分是错误的变化率。如果错误的变化率高，则导数控制的影响较大。这在过量期间最为显著，错误变化率在错误的方向加速，从而降低了回路的进取性。

#### 示例

目标 = 50 非标定值

比例增益,  $K_p = 5$   
 积分增益,  $K_i = 0.1$   
 导数增益,  $K_d = 0$

@ 时间,  $t = 0$   
 当前非标定值 = 30

$MV(t) = 5(50-30) + 0.1(50-30) + 0(50-30)$   
 $MV(t) = 100 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 102$

> $MV(t)$  限制因此控制输出 (C.O) = 100

@ $t=1$   
 当前非标定值 = 40

$MV(t) = 5(50-40) + 0.1(50-40) + 0.1(50-30) + 0(50-40)$   
 $MV(t) = 50 + 1 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 53$   
 C.O = 53

@ $t=2$   
 当前非标定值 = 45 (现在 C.O < 100, 增加放缓)

$MV(t) = 5(50-45) + 0.1(50-45) + 0.1(50-40) + 0.1(50-30) + 0(50-48)$   
 $MV(t) = 25 + 0.5 + 1 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 28.5$   
 C.O = 28.5

@ $t=3$   
 当前非标定值 = 50  
 $MV(t) = 5(50-50) + 0.1(50-50) + 0.1(50-45) + 1(50-40) + 0.1(50-30) + 0(50-50)$   
 $MV(t) = 0 + 0 + .5 + 1 + 2 + 0$   
 C.O = 3.5

已在此点上达到目标, 阀门可关闭。如果未使用积分增益, 则当前值接近目标值时阀门将关闭, 从而显著降低增加的速度。这会导致加水时间较长, 但不太可能导致过量。在一些失水的过程中, 搅拌时间越长, 此积分增益就会随着时间的推移而增加回路的进取性, 从而有效地消除损失引起的偏移。

由于大多数搅拌机系统不能过量添加, 因此必须引入一个死区。这通常是从真正的目标偏移, 以防止过量。例如, 如果目标为 5% 湿度, 则可以引入 0.2% 的偏移, 以使控制器停止在 4.8%。这补偿了加水和搅拌水以及传感器测量的时间。

在只有数字阀而非比例阀的系统中, 必须尽可能地模拟比例阀。下面的示例显示了一个简单的操作方法

### 示例

1. 定义循环周期, 如将阀门从关闭切换到打开, 然后回到关闭位置的时间
2. 定义控制周期, 例如这可能是 5 个循环周期。
3. 每个控制周期后计算  $MV(t)$ 。
4.  $80 < MV(t) \leq 100$  = 阀门在 5 个循环周期保持打开  
 $60 < MV(t) < 80$  = 阀门在 4 个循环周期保持打开, 在 1 个循环周期保持关闭  
 $40 < MV(t) < 60$  = 阀门在 3 个循环周期保持打开, 在 2 个循环周期保持关闭



$20 < MV(t) < 40$  = 阀门在 2 个循环周期保持打开，在 3 个循环周期保持关闭

$0 < MV(t) < 20$  = 阀门在 1 个循环周期保持打开，在 4 个循环周期保持关闭

与所有 PID 控制器一样，需要进行一些实验才能获得实现搅拌系统最佳性能的值。