

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.007

失重称的动态特性研究与参数设计

季婷婷¹, 唐正宁², 谢春玉³

- (1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
3. 广东省揭阳市质量计量监督检测所, 广东 揭阳 522000)

摘要: 为了保证失重称的计量精度的前提下, 提高失重称的计量速度, 笔者将称重过程中的失重称简化成基本的力学模型, 运用数学计算对称体的动态特性进行分析, 研究了称体阻尼 μ 、称体的弹性特性 k 以及阻尼平衡时间 t_p 等参数, 并得出他们之间的关系式。通过研究提出: 阻尼平衡时间 t_p 是失重称动态性能的重要参数, 他的大小直接关系到称重速度和精度。以此理论分析为前提, 可对后续失重称的参数设计提供方法。

关键词: 失重称; 衰减系数; 阻尼平衡时间; 动态分析

中图分类号: TP216 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)05-0028-04

Dynamic Characteristics Research and Parameter Design of Loss-in-Weight Feeder

Ji Tingting¹, Tang Zhengning², Xie Chunyu³

- (1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122;
3. Quality Measurement Supervision and Inspection Institute, Jieyang, Guangdong 522000, China)

Abstract: Under the premise of ensuring the measurement accuracy of loss-in-weight feeder, to increase the measurement speed of loss-in-weight feeder, this paper simplified the loss-in-weight feeder into a basic mechanical model, adopted the mathematical calculation to analyze the dynamic characteristics, studied the damping μ , elastic properties k , damping balance time t_p and obtained the relationship between them. Through the research, it is put forward that damping balance time t_p is an important parameter of loss-in-weight feeder, its value is directly related to the weighing speed and accuracy. And based on the theoretical analysis, the method can be used for the parameter design of loss-in-weight feeder.

Keywords: loss-in-weight feeder; attenuation coefficient; damping balance time; dynamic analysis

称质量式计量有很多种方式, 失重称是其中一种, 而且失重称可以实现连续计量。自20世纪80年代中后期开始, 失重称便广泛地应用于各流程工业领域中^[1-2]。其不仅可以动态计量, 也可以静态计量, 还具有结构简单、容易实现和方便维修的优点^[3-4], 并有完善的闭环控制系统^[5]。失重称逐步地取代了皮带称、螺旋秤等连续计量设备。目前相关行业的学者主要从研究失重称的控制策略方向出发, 来提高称体的计量

精度和称重时间。例如王福忠等提出一种用于失重称配料的模糊控制方法^[6]; 苏登等在失重计量技术上应用了参考模型自控制理论^[7]。但是这种研究方法不具有普适性, 故而笔者从称体本身出发, 来对其进行进一步研究。

文中通过建立弹簧秤的称体动态力学模型, 分析其自由振动时的运动微分方程, 得出失重称的总质量、阻尼、称体的刚度、衰减系数和阻尼平衡时间之间的关

收稿日期: 2017-01-16; 修回日期: 2017-03-15

第一作者简介: 季婷婷(1993), 女, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要研究方向为包装技术与工程。通信作者: 唐正宁(1963), 男, 江苏太仓人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为包装机械设计、印刷技术及设备。E-mail: tangzhengning@sina.com

系。在此基础上,针对之后实际生产中所给出的失重称参数,对其进行参数分析和计算。

1 失重称的工作原理

1.1 失重称的组成

失重秤由两大块组成,控制部分和机械部分。机械部分主要由储料仓、失重仓、阀门及输送螺杆等组成;控制部分主要由称重传感器、变频器、控制器及上位机(主机)等组成。具体结构如图1所示。其中,失重称的核心部分是控制器,一切的处理、控制功能都是通过控制器来实现的^[8]。

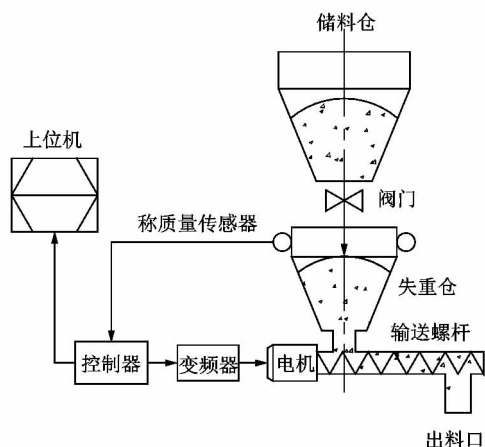


图1 失重称的组成

Figure 1 Composition of loss-in-weight feeder

1.2 失重称的工作原理分析

失重称采用间隙装料,连续出料的工作方式^[9]。其工作过程主要可以分为2个部分,即上料和下料。

1) 上料。因为失重仓上安装有称重质量传感器,可以帮助其检测到内部的物料质量,所以被称作失重仓。当失重仓内的粉体不断减少,减少到下限A时,称重质量传感器测得该信号,然后通过控制器将该信号反馈到上位机,上位机控制阀门使其打开,重新开始上料。当失重仓的质量达到上限B时,同样地,停止加料的指令通过控制器反馈到上位机,阀门开始关闭,当到达C点时,加料阀门完全关闭。上、下料过程如图2所示。在A到C的时间内,输送螺杆以固定速度运行,即容积式计量。

2) 下料。此后,如图2所示,在C到A的过程中,首先上位机内有预先设置好的流量值,然后控制器计算出采样时间内失重仓的质量减少量,从而得出实际流量。将实际流量和设置值相比,同时输出调节信号,该信号通过变频器对电机进行调速。因为螺杆由电机带动,电机转速改变,使得螺杆的转速也被改变,使实

时流量接近设定值,精确计量的目的就得以实现。C到A的过程,就是下料过程,也就是质量式计量。

当料仓内物料重量从C变为A,再从A变为C,形成了上、下料的一个完整的工作周期。

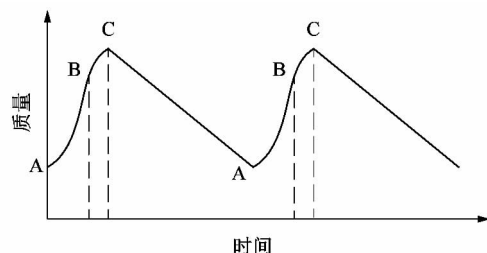


图2 失重称的上料下料过程

Figure 2 Process of loading and unloading of loss-in-weight feeder

2 称体部分力学模型的建立

前面章节简要地介绍了失重称的工作原理,本章节通过对失重称称体力学模型的建立,来分析称体的动态性能。失重计量装置的称体部分如图3所示。

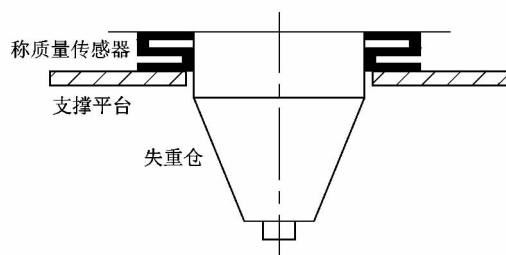


图3 失重装置的称体部分

Figure 3 Scale part of loss-in-weight feeder

失重仓下方有一个称重质量传感器,传感器支撑在平台上,其内部有弹性元件和阻尼元件,可将其简化成图4所示的模型。失重仓做上下方向上的平动,其线位移为 x ,自由振动的时候,其运动微分方程为

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (1)$$

式中: M 为失重仓和弹性垫片的总质量,kg; μ 为阻尼系数,kg/s; k 为弹性垫片的总刚度,N/mm。

将式(1)转换成标准式,即

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0; \quad (2)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} \text{ 或 } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{Me_0}}; \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{u}{2M\omega_0} \text{ 或 } \zeta = \frac{u}{2} \sqrt{\frac{e_0}{M}}. \quad (4)$$

式中: ω_0 为称体的固有角频率, s^{-1} ; ζ 为称体的衰减系

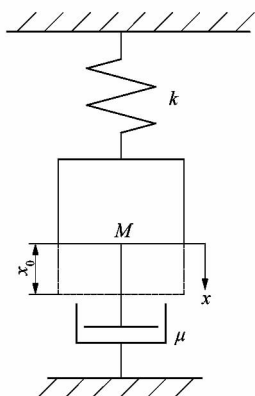


图4 力学模型

Figure 4 Mechanical model

数; e_0 为称体的灵敏度, $e_0 = \frac{1}{k}$ 。

将称体处于平衡状态时的位置取做坐标原点。将外界干扰称体使其离开平衡位置,开始自由振动时的位置设为 x_0 ,此时速度为0。所以此时初始条件可以写成:

$$t=0 \text{ 时}, x=x_0, \frac{dx}{dt}=0。$$

根据此初始条件,可以得到式(2)的通解:

$$\text{若 } \zeta < 1, x = \frac{x_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0 t + \psi)。 \quad (5)$$

$$\text{其中}, \psi = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = \arccos \zeta。$$

$$\text{若 } \zeta = 1, x = x_0(1 + \omega_0 t)e^{-\omega_0 t}。 \quad (6)$$

$$\text{若 } \zeta > 1, x = x_0 \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}} \right) e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2-1})\omega_0 t} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}} \right) e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2-1})\omega_0 t} \right]。 \quad (7)$$

将上述的通解绘制成函数曲线,其形状大致如图5所示。由图5可以看出,当称体的衰减系数 ζ 不同的时候,称体的振动曲线也不同,平衡时间也各有长短。当 $\zeta < 1$ 时,在该函数曲线下,它的第1个峰值对于平衡位置的差距 x_p 比其他2种函数曲线都要小,且此时阻尼平衡时间 t_p 也最短。所以,当称体的衰减系数 $\zeta < 1$ 的时候,称体可最快达到动态平衡。通常取 $\zeta = 0.6 \sim 0.9$ 。

课题组的目标是,在确保失重称的精度前提下,选一个适合的 ζ ,使失重称的 t_p 最小,即恢复到平衡可以用最少的时间。可以用称体线位移的相对误差 δ_x 来表示失重称精度:

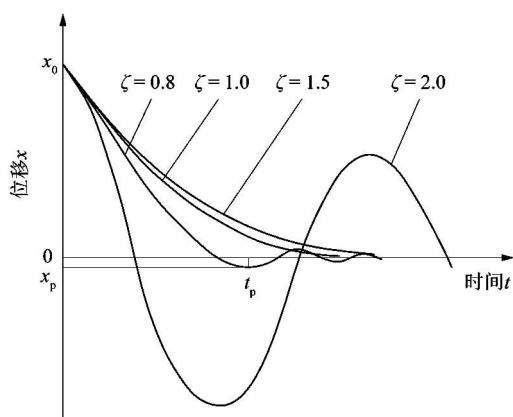


图5 不同衰减系数称体的自由振动曲线

Figure 5 Free vibration curve of loss-in-weight feeder with different ζ

$$\delta_x = \frac{x_p}{x_0}。 \quad (8)$$

从图5中可以看到, $t=t_p$ 的时候, $x=x_p$ 。称体有一个许用超调量 $[x_p]$,且 $[x_p] = ue_0$ 。其中, u 是称体的最小分辨率; e_0 是指称体的灵敏度。所以只有在 $x_p \leq [x_p]$ 的时候,才可以恰好认为称体基本恢复到了平衡位置。而 x_0 的值可以根据失重称的位移限制来确定。同时,由于每个称体都会有一个许用的最大称重值 $M_{\max}$,所以称体的最大位移量 $x_{0\max} = M_{\max} e_0$,并且 $x_0 \leq x_{0\max}$,所以式(8)也可以写做

$$\delta_x = \frac{u}{M_{\max}}。 \quad (9)$$

式(9)表明, δ_x 也可以由称重的相对误差求出,但是在实际的生产应用中,还是应该根据具体的生产要求给出。

和 x_p 相对应的时间为阻尼平衡时间 t_p ,实际应用中取 $\zeta < 1$,所以由式(5)得

$$\delta_x = \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0 t_p} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0 t_p + \psi)。 \quad (10)$$

由于 δ_x 是根据具体的生产要求给出的,并且方程(10)不易求解,所以先将 ζ 和 $\omega_0 t_p$ 代入公式(10),得到 δ_x 如表1所示。 $\omega_0 t_p$ 是在 ζ 和 δ_x 已知的情况下所能求得的最小值,即可求出的最短时间 t_p 。在实际的生产设计中,已知 δ_x ,便可以查表1得到最合适的 ζ 和 $\omega_0 t_p$,进而可以解得 t_p 。

3 失重称的参数设计与校核

现需要为锂电池的正极配料系统设计一个失重称,该失重称的已知参数是 $k = 980 \text{ N/mm}$,阻尼系数为 $\mu = 375 \text{ kg/s}$,需要达到的计量精度是 $\delta_x = 0.0050$,

查表 1 可得, ζ 和 $\omega_0 t_p$ 的最佳值分别是 $\zeta = 0.86$ 和 $\omega_0 t_p = 6.20$ 。根据式(4)可以得到称体的总质量应是 $M = 48.50 \text{ kg}$, 所以设计失重称的时候, 其总质量在 48.50 kg 左右时, 可以最快地实现动态平衡, 此时的阻尼平衡时间是 $t_p = 1.90 \text{ s}$ 。

表 1 失重称的 ζ 和 $\omega_0 t_p$ 的列表值

Table 1 Values of ζ and $\omega_0 t_p$ of loss-in-weight feeder

相对 误差 δ_x	衰减 系数 ζ	固有角频率和 阻尼平衡时间 的乘积 $\omega_0 t_p$	相对 误差 δ_x	衰减 系数 ζ	固有角频率和 阻尼平衡时间 的乘积 $\omega_0 t_p$
0.001 5	0.90	7.20	0.017 0	0.79	5.12
0.002 7	0.89	6.90	0.019 0	0.78	5.02
0.002 9	0.88	6.60	0.023 0	0.77	4.92
0.003 9	0.87	6.40	0.025 0	0.76	4.83
0.005 0	0.86	6.20	0.028 0	0.75	4.75
0.006 3	0.85	6.00	0.032 0	0.74	4.67
0.007 7	0.84	5.80	0.035 0	0.73	4.60
0.009 3	0.83	5.60	0.038 0	0.72	4.52
0.011 0	0.82	5.50	0.042 0	0.71	4.46
0.013 0	0.81	5.40	0.046 0	0.70	4.40
0.015 0	0.80	5.20	0.095 0	0.60	3.33

4 结语

1) 笔者通过对失重称的称体结构进行了简化, 并建立了自由振动的运动微分方程对其进一步求解, 得到阻尼平衡时间的计算方法, 该方法对于失重称的设

计具有重要意义;

2) 用所得到的计算方法, 在给定条件下, 得到了合适的衰减系数和称体的理想总质量 M , 并对失重称的阻尼平衡时间 t_p 进行了计算, 得到了实际生产中快速实现动态平衡的时间。

参考文献:

- [1] 曹艳英, 邵军. 全自动粉、粒料包装机设计[J]. 包装工程, 2002, 23(增刊 1): 16-35.
- [2] 戴宏民. 包装机械技术发展趋势及我国的应对[J]. 轻工机械, 2003, 21(4): 1-4.
- [3] 陈耕, 杨国强. 失重秤原理及波动原因分析[J]. 铜业工程, 2011(6): 59-62.
- [4] 袁曙光, 陈文成, 刘朝阳, 等. 连续式失重秤在粉煤灰计量中的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2013, 19(1): 62-63.
- [5] 徐晓伟, 刘成安, 赵伟. 基于 ADAM5510 的新型失重秤设计[J]. 自动化与仪表, 2008, 23(8): 47-50.
- [6] 王福忠, 高彩霞, 王巧莲, 等. 基于模糊控制的失重秤配料过程控制策略[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 302-306.
- [7] 苏登, 汤晓华. 模型参考自适应控制在失重量计量技术上的应用研究[J]. 电子世界, 2015(19): 185-186.
- [8] 方玉莹, 左言言. 包装机械计量装置的原理与设计探讨[J]. 轻工机械, 2005, 23(3): 46-48.
- [9] 周振锋, 何晓东. 用于连续式搅拌设备计量的差分减量(失重)秤[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(7): 19-21.

(上接第 27 页)

4 结语

热成型过程中薄膜内部温度随时间变化通常 $\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$, 因此并不属于稳态热传导, 不能使用傅里叶定理进行传热分析^[9]。而复合薄膜由于各层薄膜的热扩散率不同, 无法直接使用非稳态导热微分方程。课题组通过 Laplace 变换计算得到两层复合薄膜在第一类边界条件下非稳态导热的理论解, 该方法亦可推广到多层复合薄膜的非稳态导热分析。确定实际应用时各参数值后, 借助 MATLAB 软件绘制 $\theta-t$ 和 $\theta-\delta$ 图像, 即该条件下薄膜的传热情况, 同时可得到所需温度下的加热、冷却时间以及薄膜内部的温度梯度, 据此分析优化加热系统与冷却系统, 设定合理的成型温度、冷却方式以及脱模形式, 为热成型工艺研究提供了新的设计依据。

参考文献:

- [1] 王洪江, 刘海军, 耿忠德. 热成型容器及在包装中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 221-224.
- [2] 喻国平, 黄锐. 热成型过程中的冷却过程分析[J]. 中国塑料, 2000, 14(7): 62-66.
- [3] 俞昌铭. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [4] 许亮, 周树民, 何伟, 等. 复合介质传热的非稳态温度场建模及其计算[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 3(23): 31-34.
- [5] 王经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007: 93-95.
- [6] 冯卫兵. 复变函数与积分变换[M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015: 195-201.
- [7] ILLIG A. Thermoforming: a practical guide[M]. Gardner: Hanser, 2000: 12-26.
- [8] 张帆. 薄膜性能学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014: 298.
- [9] 王振时. 热力学及传热原理[M]. 北京: 国防出版社, 1957: 144-147.