

称重传感器的动态特性与动态误差

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】本文分析了动态测力与动态称重的基本特点，称重传感器用于静态称重与动态称重的根本区别。重点介绍了利用试验手段研究称重传感器动态性能的逻辑推理和运算方法，通过建立动态数学模型和传递函数分析称重传感器的动态响应、动态性能和动态误差，简要介绍了利用动力试验对称重传感器进行动态校准的基本方法。

【关键词】称重传感器；动态测力；动态称重；动态特性；动态校准；动态误差

文献标识码：B 文章编号：1003-1870（2023）06-0005-11

概述

随着科学技术的进步，工业生产网络化、数字化、智能化水平的提高，许多工业、商业、物流、公路铁路建设等领域，提出了动态力测量和加快称重速度，缩短称重时间的要求，迫切需要解决动态力测量和快速称重、动态称重的问题。怎样才能可靠地进行动态称重计量？对现有的应变式称重传感器（以下简称称重传感器）能否只进行静态标定就用于动态称重计量系统？也就是现在一些企业对常规的称重传感器进行“静态标定动态使用”是否合理？这就涉及称重传感器测量系统的动态特性与动态误差问题。

动态特性就是指称重传感器的输出量对于随时间变化的输入量的响应特性。对于不同形状和性质的输入函数，称重传感器将有不同的响应。动态特性好的称重传感器，其输出随时间变化的曲线与输入随时间变化的曲线一致或相似。由于称重传感器用于动态称重系统时的输入量随时间变化的形式可能是各种各样的，一般情况下输出曲线与输入曲线是不相同的，所以只能选择标准的输入信号对称重传感器的动态响应特性进行分析和标定。通常多采用正弦变化和阶跃变化的两种信号作为“标准”输入信号，前者称为“称重传感器的稳态响应或频率响

应”，后者称为“称重传感器的瞬态响应或阶跃响应”。

原国家技术监督局1990年批准实施的“动态力传感器”检定规程，在技术要求中对动态技术指标（分为时间域和频率域指标）做出明确规定，即时间域：力的相对幅值准确度、自振频率（包括传感器的自振频率和传感器安装后系统的自振频率）、上升时间。频率域：工作频率范围、工作频率范围内相对幅值准确度和共振频率。其中：上升时间——在阶跃力的作用下传感器响应第一次达到最终稳态值的10%~90%所需的时间。自振频率——传感器有阻尼的自由振荡频率。共振频率——传感器在动态力作用下幅值比达到峰值时的频率。

称重实质上是测量物体的质量，从古至今，物体的质量都是通过它在重力场下的重力测量来求得的。尽管重力也是力的一种形式，但是动态测力与动态称重却是两个不同的概念。动态测力时，输入量 $X(t)$ 总是不断变化的，测力传感器的输出量 $Y(t)$ 也是不断变化的，这就要求动态力测量系统要跟踪被测力值变化。因此，对测力传感器的瞬态特性要求较高，具体要求是幅频要有足够的平坦区，相位响应在相当宽的范围内是线性的，以免引起波形失真，产生测量误差。动态称重时，被测物体的

质量少数是变化的，例如电子皮带秤所称量的物料多数是恒定的。就后者而言，对动态称重系统瞬态特性的要求可以放宽些，只要在允许的称重时间内能够达到稳态，准确的测量出重量即可。而频带的宽窄，相位的线性，波形的失真与否都不是非常重要的。当然这仅仅是对整个测量系统而言，就称重传感器来讲，绝不排除它具有优良的瞬态特性和稳态特性。

从上述分析不难得出，称重传感器用于动态称重时它的输出信号幅值和相位与用于静态称重时存在着根本区别。从时间域来看，静态称重时称重传感器的输出与时间无关，即输出不随时间变化。动态称重时称重传感器的输出与时间有关，即输出随着时间的变化而变化（包括瞬态变化和连续变化）。从频率域来看，静态称重时称重传感器的输出信号频谱只有零数。动态称重时称重传感器的输出信号频谱具有各种频率成分，对周期信号为分离频谱，对非周期信号为连续频谱。

在静态称重中，称重传感器组成的理想线性称重系统的特性方程为 $Y=kX$ ，式中 k 为常数，即输出 Y 是输入 X 的线性函数，称重系统具有恒定的增益。

在动态称重中，同样希望动态称重系统具有很

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_m \frac{d^m X}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX}{dt} + b_0 X \quad (1)$$

式中：Y——输出量；

X——输入量（被测量）；

t——时间；

a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 ——仅与测量系统特性有关的常数；

b_m, b_{m-1}, \dots, b_0 ——仅与测量系统特性有关的常数；

$\frac{d^n Y}{dt^n}$ ——输出量对时间 t 的 n 阶导数；

$\frac{d^m X}{dt^m}$ ——输入量对时间 t 的 m 阶导数。

在式（1）的结构常数 b_i 中，除 $b_0 \neq 0$ 外，其余各项 $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$ ，故式（1）可改写为：

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_0 X \quad (2)$$

好的线性，即称重传感器具有理想的响应，在时间域 $Y(t) = CX(t)$ ，在频率域 $Y(j\omega) = CX(j\omega)$ ，若要满足上述两式，其频率特性应是一个常数。然而，由于称重传感器是单自由度二阶线性系统，其储能部件（弹性元件）将使频率特性 $H(j\omega)$ 与频率有关，要实现频率特性 $H(j\omega)$ 为一常数是是不可能的。由于在动态称重过程中最为严重的情况是输入 $X(t)$ 总是不断变化的，称重传感器的输出 $Y(t)$ 也是不断变化的，动态称重的任务就是通过称重传感器的输出 $Y(t)$ 来获得输入 $X(t)$ ，这就要求输出 $Y(t)$ 能够实时、无失真地跟踪输入 $X(t)$ 的变化。因此，必须研究、分析称重传感器的动态特性与动态误差。

1 称重传感器的动态数学模型与传递函数

1.1 称重传感器的动态数学模型

若要准确地建立称重传感器的数学模型是非常困难的，在工程上一般多采用一些近似方法，省略一些影响不大的因素。通常把称重传感器看作是单自由度的二阶线性系统，它的数学模型为常系数线性微分方程。

对于线性定常（时间不变）系统，其数学模型为高阶常系数线性微分方程，即

由式（2）知，取 $b_0 = a_0$ 时，称重传感器的微分方程为：

$$a_2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + \frac{dY}{dt} + a_0 Y = a_0 X \quad (3)$$

工程上一般都将式（3）改写为：

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dY}{dt} + \omega_0^2 Y = \omega_0^2 X \quad (4)$$

式中： ω_0 ——称重传感器的固有频率， $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ ；

ξ ——称重传感器的阻尼比， $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2 a_0}}$ 。

对于一个较为复杂的系统或复杂的输入信号，求解式（1）或式（4）的微分方程是很困难的。工程上通常用一些能够反映系统动态特性的函数，将此系统的输出与输入联系起来。这些函数有传递函数、频率响应函数、脉冲响应函数等。

1.2 称重传感器的传递函数

称重传感器的传递函数定义为输出信号 $Y(t)$

的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 和输入信号 $x(t)$ 的拉普拉斯变换 $X(s)$ 的比值，并记为 $H(s)$ ，即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

对式（1）两边取拉普拉斯变换，并设初始条件为零，即认为输入 $x(t)$ 、输出 $Y(t)$ 及它们对时间各阶导数的初始值 $t=0$ 时，得：

$$Y(s)(a_n + a_{n-1}s + \dots + a_1s + a_0) = X(s)(b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0s^n) \quad (5)$$

式中 s 为复变量， $s = \beta + j\omega$ ， $\beta > 0$ 。

根据上述定义，称重传感器的传递函数为：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (6)$$

将微分方程式（4）经过拉普拉斯变换，即可得出工程上用的称重传感器传递函数公式。

微分方程式（4）的拉氏变换为：

$$\left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1\right)Y(s) = X(s)$$

则称重传感器的传递函数为：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (7)$$

1.3 称重传感器的频率响应函数

对线性定常系统，在式（5）中可以用傅里叶变换代替拉普拉斯变换，设输入 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(j\omega)$ ，输出 $y(t)$ 的傅里叶变换为 $Y(j\omega)$ ，则

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (8)$$

$H(j\omega)$ 为称重传感器的频率响应函数，简称为频率响应或频率特性。它是在频率域中对动态称重传感器传递特性的描述。

频率响应函数 $H(j\omega)$ 通常是一个复函数。设其实部、虚部分别为 $H_r(\omega)$ 和 $H_i(\omega)$ 可以用指数形式表示为：

$$H(j\omega) = H_r(\omega) + jH_i(\omega) = A(j\omega) e^{-j\phi(\omega)}$$

式中：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_r(\omega)]^2 + [H_i(\omega)]^2} \quad (9)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{H_i(\omega)}{H_r(\omega)} \quad (10)$$

式(9)称为称重传感器的幅频特性,表示输出与输入幅值之比随频率的变化,也称为动态灵敏度。在研究动态称重传感器的频率域特性时主要用幅频特性。

式(10)称为称重传感器的相频特性,表示输出超前输入的角度,通常输出总是滞后于输入,因此总是负值。两者之间有一定的内在联系,研究称重传感器的频率特性时主要用幅频特性。

1.4 称重传感器的脉冲响应函数

在式(5)中,若选取一种输入函数 $x(t)$ 使 $L[x(t)]=1$,则会使传递函数大大简化。由于单位脉冲函数 $\delta(t)$ 的拉普拉斯变换为:

$$\Delta(s) = L[\delta(t)] = \int_0^{\infty} \delta(t)e^{-st} dt = e^{-st} \Big|_{t=0} = 1 \quad (11)$$

故以 $\delta(t)$ 为输入时称重传感器系统的传递函数为:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{\Delta(s)} = Y(s) \quad (12)$$

再对式(12)两边取反拉普拉斯变换,并令 $L^{-1}[Y(s)]=h(t)$,则

$$h(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}[Y(s)] = y_{\delta}(t) \quad (13)$$

式(13)为动态称重传感器的脉冲响应函数。它表明单位脉冲函数的响应同样可以描述称重传感器的动态特性,它和传递函数是等价的,所不同的是一个在复数域,一个在时间域。

2 称重传感器的动态响应及动态性能指标

尽管在动态称重系统中称重传感器是用于动态称重计量,但首先必须进行静态标定,以确定称重传感器的静态特性,主要是非线性指标,它是进行动态称重的基础和依据。然后再校准称重传感器的动态性能,确定称重传感器的动态响应特性。一般多从时间域和频率域进行分析:在时间域主要分析称重传感器在阶跃输入、脉冲输入下的瞬态响应特性;

在频率域主要分析称重传感器在正弦输入下的稳态特性。

2.1 时间域瞬态响应特性分析

当输入量 $X(t)$ 为单位阶跃信号时,则

$$\begin{aligned} X(t) &= \varepsilon(t) = 1, \quad t \geq 0 \\ X(t) &= \varepsilon(t) = 0, \quad t < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

若要求称重传感器对此输入信号进行无失真、无延迟测量,就必须使其输出 $Y(t)$ 满足

$$Y(t) = k\varepsilon(t) \quad (15)$$

式(15)中 k 为称重传感器的灵敏度,也称静态增益。这就要求称重传感器的传递函数 $H(s)$ 或频率特性 $H(j\omega)$ 为一常数,即

$$H(s) = k$$

$$\text{或 } H(j\omega) = k, \quad 0 \leq \omega \leq \infty \quad (16)$$

在实际测量中,要做到这一点是非常困难的,甚至是不可能的。为了理论分析和实际评估称重传感器的实际输出偏离无失真输出的程度,通常在实际输出曲线中,从幅值和时间两个方面找出有关特征,并以此作为分析和衡量时间域动态性能指标的依据。

瞬态载荷的波形是各种各样的,不可能都实施动力试验进行检测,通常多选择阶跃波作为输入,来检测称重传感器的输出响应。称重传感器经动力试验得出的阶跃输入与输出随时间变化曲线如图1所示。

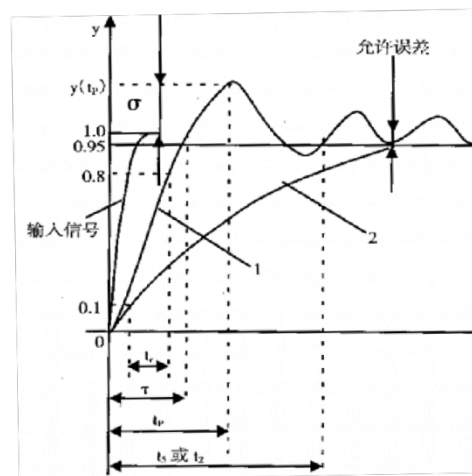


图1 阶跃输入与输出随时间变化曲线

在图1中,曲线1为称重传感器阻尼小(欠阻尼)的情况,曲线2为阻尼大(过阻尼)的情况。绝大多数称重传感器的阻尼都很小,为欠阻尼情况,允许误差一般规定为 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ 。

由称重传感器传递函数公式(6)和图1可以看出,称重传感器对阶跃信号的响应主要决定于阻尼比 ξ 和固有频率 ω_0 。固有频率 ω_0 由称重传感器结构参数决定, ω_0 越高,动态响应速度越快。当 ω_0 为常数时,其动态响应速度取决于阻尼比 ξ 。阻尼比 ξ 直接影响输出信号的振荡次数及超调量 σ 。当 $\xi=0$ 时为临界阻尼,超调量为100%时产生等幅振荡。当 $\xi > 1$ 时为过阻尼,无超调量也无振荡,但达到稳态输出所需要的时间较长。当 $\xi < 1$ 时为欠阻尼,产生衰减振荡,达到稳态输出所需要的时间随 ξ 的增加而减小。在 $\xi=1$ 时,达到稳态输出所需要的时间最短。工程中通常取 $\xi=0.6 \sim 0.8$,最大超调量为2.5%~10%,其稳态响应时间也较短。

一般都用阶跃输入与输出随时间变化曲线上的特性参数来表示瞬态响应性能指标:

(1) 时间常数 τ ——输出值上升到稳态值 $Y(\infty)$ 的63%所需要的时间。

(2) 上升时间 t_r ——输出值从稳态值 $Y(\infty)$ 的10%上升到90%所需要的时间。

(3) 响应时间 t_s 或 t_2 ——输出值进入稳态值 $Y(\infty)$ 的5%或2%的允许误差带内所需要的时间。

(4) 超调量 σ ——在过渡过程中,当输出量的最大值 $Y(t_p)$ 小于 $Y(\infty)$ 时,响应无超调量。当 $Y(t_p) > Y(\infty)$ 时,响应有超调量。超调量的定义是超过理想的稳态输出值 $Y(\infty)$ 的量 ΔY 与稳态输出值 $Y(\infty)$ 之比,即

$$\sigma = \frac{\Delta Y}{Y(\infty)} \times 100\% = \frac{Y(t_p) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\% \quad (17)$$

(5) 衰减度 ψ ——瞬态过程中振荡幅值衰减的速度,用下式表示:

$$\psi = \frac{a - a_1}{a} \times 100 \quad (18)$$

2.2 频率域稳态响应特性分析

称重传感器的稳态响应或频率响应特性是指输出信号的幅值和相位随频率变化的特性,通常用其动态特性的传递函数来分析稳态响应特性。与振动

传感器相同用于动态称重系统的称重传感器也属于单自由度二阶线性传感器,如图2所示。

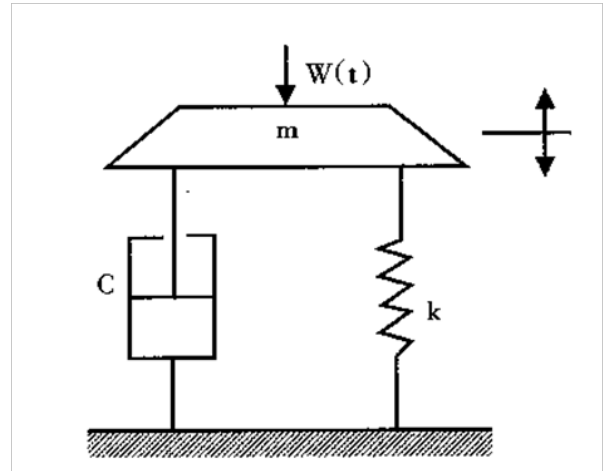


图2 单自由度二阶称重传感器

该线性定常系统有两个十分重要的性质,即叠加性和频率保持性。当系统有多个输入信号激励时,根据叠加性输出的响应等于各个输入信号单独激励作用时的响应之和进行分析,这样在分析上就可以将复杂的激励信号分解成若干简单的信号,然后求解这些简单信号激励响应之和。频率保持性表明线性系统稳态响应时输出信号的频率保持与输入信号的频率相同。无论何种输入信号都可以用傅里叶级数来表示,也就是可以用多种频率的正弦信号叠加来表示。因此,可以用称重传感器对正弦输入信号的响应特性来判断它对复杂输入信号的响应。

如图2所示的含有质量 m ,弹性元件 k ,阻尼器 c 和被测载荷 $W(t)$ 的称重传感器系统,根据牛顿第二定律其动力学方程式为:

$$m \frac{d^2 Y}{dt^2} + c \frac{dY}{dt} + kY = W(t) \quad (19)$$

将式(19)与式(3)进行比较,可得 $a_2=m$, $a_1=c$, $a_0=k$, Y 为位移。则式(6)可以写成:

$$Y + 2\xi\omega_0 Y + \omega_0^2 Y = k_1 W(t) \quad (20)$$

式中: ω_0 ——称重传感器的固有频率, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ξ ——称重传感器的阻尼比, $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

k_1 ——常数, $k_1 = \frac{1}{m}$

将式(20)写成一般通用形式,则为:

$$\frac{1}{\omega_0^2} Y + \frac{2\xi}{\omega_0} \dot{Y} + Y = \frac{k_1}{\omega_0^2} W(t) = k W(t) \quad (21)$$

式中 K 为静态灵敏度, $K = \frac{1}{m\omega_0^2}$

$$\text{频率特性为: } H(j\omega) = \frac{K}{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\xi j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (22)$$

$$\text{幅频特性为: } A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (23)$$

$$\text{相频特性为: } \psi(\omega) = \arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}$$

$$\text{或 } \psi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (24)$$

从上述公式不难看出,频率响应特性主要取决于称重传感器的固有频率 ω_0 和阻尼比 ξ 。在 $\xi < 1$ 、 $\omega_0 \gg 1$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $\psi(\omega)$ 很小,幅频特性平直,输入与输出呈线性关系,此时称重传感器的输出能真实地再现输入信号。因此在设计称重传感器时,必须使阻尼比 $\xi < 1$,固有频率 ω_0 至少应大于被测信号频率 ω 的3~5倍,即 $\omega_0 \geq (3 \sim 5)\omega$ 。

实际上对于固有频率 ω_0 要求过高将增加称重传感器弹性元件的制造难度,考虑到在整个频谱内,频率越高,幅值越小,灵敏度越低,因此固有频率 ω_0 的选择应根据测量系统的需要综合考虑。

现以输入量 $X(t)$ 为正弦信号的称重传感器为例,分析瞬态响应特性,即

$$X(t) = X_m \sin \omega t \quad (25)$$

式中: X_m ——输入信号的幅值;

ω ——输入信号的圆频率。

如果称重传感器动态响应特性好,其输出应为:

$$Y_s(t) = kX_m \sin \omega t = Y_{sm} \sin \omega t \quad (26)$$

式中 k 为称重传感器的灵敏度。

式(20)表明,如果是理想的称重传感器,其输出幅值为 $Y_m = kX_m$,并以相同的频率和相位做正弦变化。

在实际测量中,由于称重传感器有惯性等原因,它的输出幅值和相位做正弦变化,即

$$Y(t) = Y_m \sin(\omega t + \phi) \quad (27)$$

称重传感器的正弦输入与输出随时间的变化曲线如图3所示。图中曲线1是正弦输入信号 $X(t)$,曲线2是理想输入信号 $Y_s(t)$,曲线3是输出信号 $Y(t)$ 。

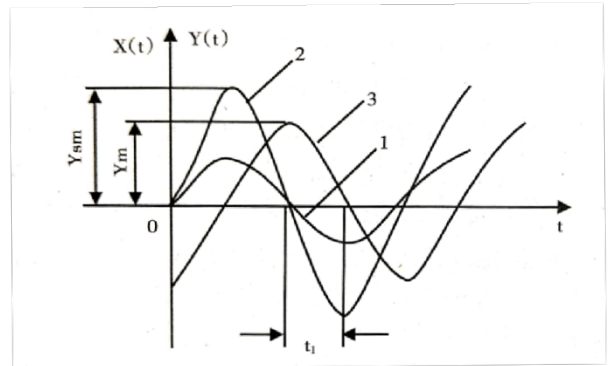


图3 正弦输入与输出随时间变化曲线

在校准称重传感器的稳态响应时,可以求得不同频率下的幅频特性曲线和相频特性曲线,如图4所示。一般要求幅值误差小于 $\pm 5\% \sim \pm 2\%$ 。根据实际需要对相位误差提出要求,例如要求在工作频率内的相位差应小于5%。

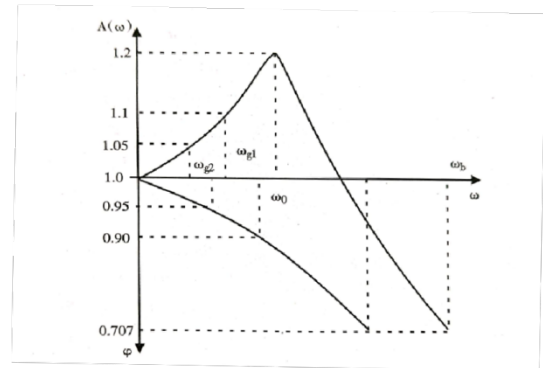


图4 幅频与相频特性曲线

可用下列指标评定称重传感器的稳态响应特性:

(1) 通频带 ω_b ——在幅频特性曲线上幅值衰减3dB时所对应的频率范围。

(2) 工作频带 ω_{g1} 或 ω_{g2} ——幅值误差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ 时所对应的频率范围。

(3) 相位误差——在工作频带范围内，称重传感器的实际输出与无失真输出之间的相位差值，即相位误差。

动态称重传感器的固有频率应能达到它本身所能达到的最高频率，这就要求弹性元件尽量是一个整体结构，使固有频率尽量高。对于圆柱式弹性元件，固有振动频率 f_0 为：

$$f_0 = 0.159 \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{EA}{m}} \quad (28)$$

式中：L——圆柱式弹性元件的高度（m）；
E——弹性元件材料的弹性模量（kg / mm²）；
A——弹性元件的横向截面积（m²）；
m——弹性元件单位长度的质量（kg / m）。

用弹性元件的质量和长度表示单位长度的质量，经进一步变换后得：

$$m = A \rho \quad (29)$$

式中 ρ 为弹性元件材料的密度。

从上述公式可看出：

(1) 固有频率与弹性元件结构及某些尺寸、材料的弹性模量 E 和密度 ρ 有关。E 越大， ρ 越小， f_0 就越高。

(2) 在满足圣维南力的扩散原理前提下，L 越小， f_0 越高。

(3) 固有频率取决于弹性元件及其连接件运动部分的质量，因此，设计时应尽量减少这些部件的质量。

(4) 在额定载荷下应变区应有合适的应力水平，不应取得太高。只有较低的应力水平，才能保证弹性元件有较大的刚性和较高的固有频率，也意味着对理想线性性能的偏差最小。

将 m 和 π 代入 (28) 式，得

$$f_0 = \frac{0.249}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (30)$$

综上所述，称重传感器的动态性能指标有：固有频率 ω_0 ，阻尼系数（阻尼比） ξ ，频率响应范围，频率特性，时间常数 τ ，上升时间 t_r ，响应时间，超

调量 σ ，衰减率 ψ ，稳态误差，临界速度，临界频率等。

3 称重传感器的动态特性校准与动态误差

动态特性校准（或称动态标定）的目的是研究和分析称重传感器的动态响应以及与动态响应有关的特性参数、性能指标，例如固有频率 ω_0 ，阻尼比 ξ ，时间常数 τ ，上升时间 t_r ，峰值时间 t_p ，频率响应范围和最大超调量等。动态特性校准时，称重传感器的输入信号应该是一个标准的激励函数，如阶跃函数、正弦函数等。在称重传感器的输入、输出信号间建立起时间域或频率域的函数，并由此函数校准时间域或频率域的特性参数。

目前，世界各国尚无统一的动态特性校准方法，但在动态特性校准原理和工艺上存在共识，这就是为了获取称重传感器典型输入下的动态响应必须有合适的动态特性校准设备和科学而精密的校准工艺，包括典型输入信号发生设备，动态信号记录仪器和数据采集处理系统等。目前，世界各国应用较多的是动力校准法，就是利用动力试验，给力与称重传感器施加一个标准激励，测量出整个信号通道的响应，从而确定其动态特性的传递函数，再以此确定频率特性、幅频特性和相频特性。我国计量检测机构实施的《负荷传感器动态特性校准规范》规定的校准项目为上升时间，固有频率，幅频特性，相频特性。

在动力校准法中，利用电动力激励器直接获得频率特性的方法最为先进，我国目前还没有使用这种校准设备。电动力激励器实际上就是一种电磁力马达，其总体结构与电磁式振动台相似，主要是由直流磁场、非导磁材料制成的加力棒和缠绕在加力棒上的激励绕组等组成。电动力激励器的工作原理是处于直流磁场中的载流导体，将产生劳仑茨力（电动力）。即当激励绕组通电流时，在磁场的作用下加力棒将作用到一个电动力，此力的大小与磁场的磁感强度、激励绕组的电流强度和匝数成正比，其波形决定于激励电流的波形。如果在激励绕组中通以幅值恒定、频率可变的正弦电流时，力与称重传感器就会作用到一个可变的正弦力，根据不同频率下测量输出信号的幅值和相位就可求得频率特性。

采用电动力激励器直接获得频率特性的动态校

准法，其最大的特点是可以很快得出力与称重传感器的频率特性，但需要有性能良好的电动力激励器和高响应的测量系统。我国称重传感器动态特性校准所用的标准激励源主要有两种：一是瞬变函数，如阶跃信号、半正弦波信号等，多应用阶跃信号。二是周期性函数，如正弦波、三角波信号等，多应用正弦波信号。

我国校准力与称重传感器动态特性多用落锤式冲击力试验机，校准压力传感器的动态特性多用落锤式阶跃压力发生器。两者皆可以产生钟形脉冲信号（高斯函数），其表达式为：

$$f(t) = E e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^2} \quad (31)$$

式中 $\alpha=0.3295$ ，其钟形脉冲信号如图 5 所示。

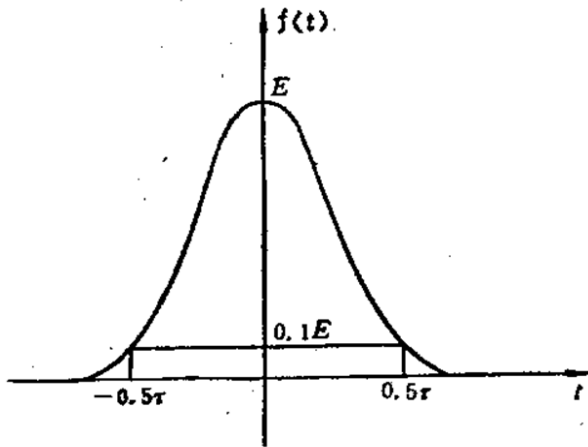


图5 钟形脉冲信号

利用标准振动台对称重传感器进行动态特性校准，可以产生正弦力信号，其函数表达式为：

$$F(t) = K \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (32)$$

式中角频率 ω 与周期 T 、频率 F 满足下列关系式为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (33)$$

标准振动台产生的正弦力信号如图 6 所示。

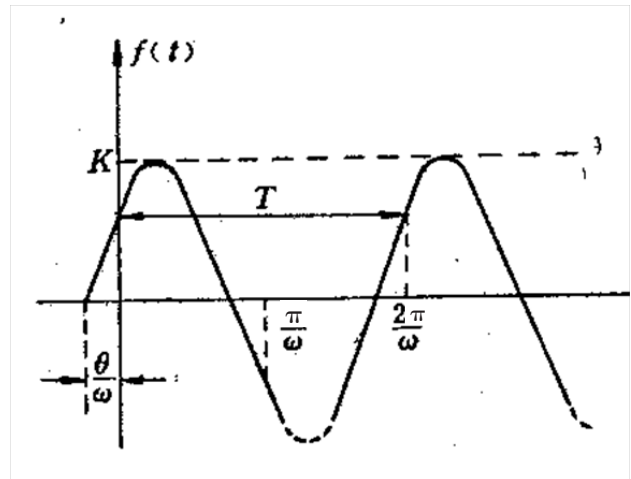


图6 正弦信号

动态特性校准时称重传感器的动态性能用时间域表示的优点是简单、直观。国内一些科研部门多用动态特性校准阶跃过渡过程响应曲线上的性能参数来确定称重传感器的时间域特性指标。用频率域表示的数学基础是傅里叶分析法，即信号频谱分析法。其优点是可以直接了解信号的本质，频率与幅值、频率与相位的关系。例如，用于在线自动定量包装等系统的动态称重传感器，如果每分钟称重 300 次，相当于在 0.2s 称重时间内称重一次。由于整个称重时间的 2/3 可能用于替换重物，故剩下的实际称重时间只有 67ms，对动态性能要求较高。因此必须进行严格的动态校准，用频率域分析法确定其稳态响应特性。由于在动态校准之前，传递函数中的系数 ω_0 和 ξ 是未知数，必须通过动态校准才能直接求得。

我国力与称重传感器的动态特性校准系统多由冲击力的力源，即落锤式动态力标准装置、标准参考测量系统和信号处理系统组成。落锤式动态力标准装置的特点是，落锤式冲击力源为一整体结构，刚性大，重锤质量均匀、集中，接近为刚体，从而保证冲击力波形光滑，频率响应高。通过调节落锤的重量、提升高度以及改变橡胶减震垫，可以在很宽的频率范围内获得所需要的动态力脉冲信号。设备结构简单，使用方便。缺点是落锤冲击时产生的脉冲幅值和波形受到落锤质量、接触面强度、接触部位变动等影响，使得重复性较差。进行动态校准时，标准冲击加速度计安装在重锤上，被检的力与

称重传感器安装在落锤式动态力标准装置的砧子上，重锤自由下落作用在被检力与称重传感器上，此时标准参考测量系统和被检力与称重传感器测量系统同时、分别响应，将响应信号记录（显示、打印或储存）进行数据处理。落锤式冲击力源为一整体结构的落锤冲击力试验机，由砧子、机座、立柱、标尺、提升和释放机构、重锤、导向器、减震垫，以及标准冲击加速度计等组成，其结构简图如图7所示。

力与称重传感器动态性能校准系统框图如图8所示。

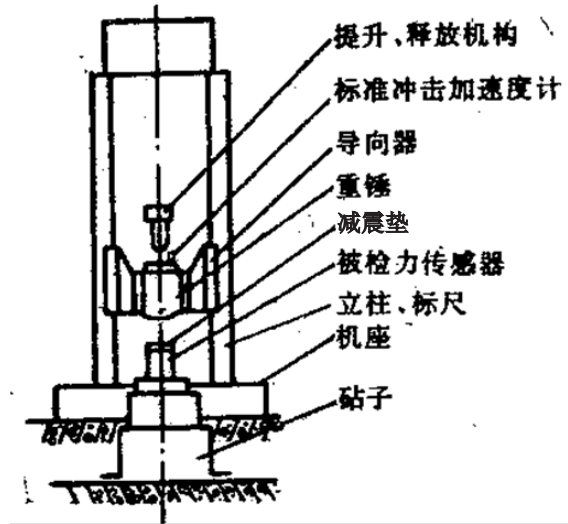


图7 落锤冲击力试验机

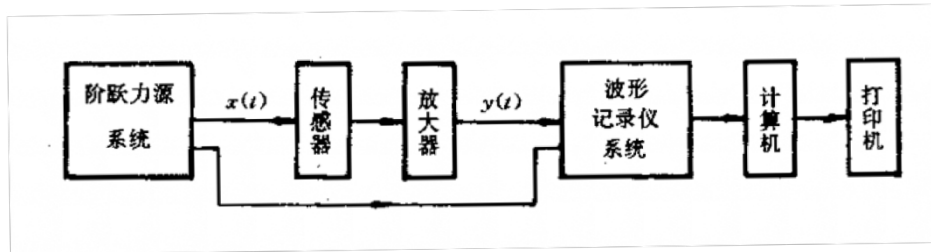


图8 力与称重传感器动态校准系统框图

3.1 时间域的技术性能校准

对安装的力与称重传感器系统，按使用要求的上升时间或脉冲持续时间进行力的幅值性能检定。要求施加的动态力值应覆盖被检力与称重传感器的额定范围或欲使用范围。力值级数不得少于五级，在每一级动态力测量值附近至少做三次。根据以下公式计算力的相对幅值准确度 E_{At} ：

$$e_{Ati} = \frac{F_{ci} - F_{ri}}{F_{ri}} \times 100 [\%] \quad (34)$$

$$e_{At} = |e_{Ati}|_{\max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (35)$$

$$E_{At} = \sqrt{(e_s)^2 + (e_{At})^2} \quad (36)$$

式中： e_{Ati} ——第*i*点校准力值的相对幅值误差；

F_{ci} ——被检力与称重传感器第*i*点输出所对应的力值（取静态平均端点直线上对应的力值）；

F_{ri} ——参考测量系统第*i*点输出所对应的力值；

e_{At} ——被检力与称重传感器的最大相对幅值误差；

n ——校准点数；

e_s ——标准装置的不确定度。

对被检力与称重传感器施加脉冲函数的力信号，响应是阻尼衰减振荡的瞬变过程，记录响应信号，并读取上升时间 t_r （施加阶跃力时），要求重复三次。对记录的阻尼衰减振荡信号进行分析，并将各阶振荡频率分开（可用谱分析方法），具有较大幅值的最低振荡频率为力与称重传感器的自振频率 f_r 。按下式计算自振频率标称值 f_m 与实测值 f_r 的相对差值 e_f ：

$$e_f = \frac{f_m - f_r}{f_r} \times 100 [\%] \quad (37)$$

式中自振频率 f_m 可通过施加脉冲力值，记录力与称重传感器系统的衰减阻尼振荡信号求得。

3.2 频率域的技术性能校准

(1) 用瞬态力信号源激励

施加动态力的级数一般应在被检力与称重传感器额定范围或欲使用范围内选定高、中、低三种力值，在每一级动态力值附近至少做三次。在选择高力值时，必须考虑校准中的过冲量不要超过额定力值。

校准时，将参考测量系统的信号作为输入 $x(n)$ (n 为采样点数)，被检力与称重传感器的信号作为输出 $y(n)$ 进行信号处理，经过快速傅里叶变换 (FFT)，得出频率域的传递函数计算公式。

$$H(k) = \frac{G_{YX}(k)}{G_{XY}(k)} = R(k) + jI(k) \quad (38)$$

其中： $G_{XY}(k) = X(k)^* \cdot Y(k)$

$G_{XX}(k) = X(k)^* \cdot X(k)$

而 $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{2j\pi nk}{N}}$

$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-\frac{2j\pi nk}{N}}$

式中： $G_{XY}(k)$ ——互功率谱；

$G_{XX}(k)$ ——自功率谱；

$X(k)$ —— $x(n)$ 的傅里叶变换；

$X(k)^*$ —— $X(k)$ 的共轭复函数；

$Y(k)^*$ —— $y(n)$ 的复里叶变换；

$R(k)$ 、 $I(k)$ —— $H(k)$ 的实部、虚部；

K ——离散频率点数。

按以下公式计算频率域的幅频特性、相频特性技术指标。

幅频特性：

$$A(k) = |H(k)| = \sqrt{[R(k)]^2 + [I(k)]^2} \quad (39)$$

相频特性：

$$\varphi(k) = \arctan \frac{I(k)}{R(k)} \quad (40)$$

由式 (36) 确定被检力与称重传感器的工作频率范围和共振频率 f_0 。在工作频率范围内相对幅值准确度 E_{Af} 按下式计算：

$$e_{Af} = \left[\frac{A(k_m)}{A(0)} - 1 \right] \times 100\% \quad (41)$$

$$E_{Af} = \sqrt{(e_s)^2 + (e_{Af})^2} \quad (42)$$

式中： e_{Af} ——在工作频率范围内最大相对幅值误差；

$A(0)$ ——频率等于零时的相对幅值；

$A(k_m)$ ——在工作频率范围内相对幅值误差最大时的相对幅值；

K_m ——在工作频率范围内具有最大相对幅值误差的离散频率点。

(2) 用正弦力信号源激励

被检力与称重传感器应在与使用时相同或类似的状态下进行检定。其检定方法为：在力值不变情况下改变频率，在规定的范围内选取的频率校准点不得少于 7 个，每个点重复 3 次。将各频率点所测得的幅值与相应的参考量输出幅值进行归一化处理得到幅频特性，由此确定，被检力与称重传感器的工作频率范围 B 和共振频率 f_0 ，由式 (38)、式 (39) 计算工作频率范围 B 内相对幅值准确度 E_{At} 。

4 结语

称重，实质上是测量物体的质量。众所周知，质量的测量从古至今都是通过物体在重力场下的重力测量来求得的，即 $W=mg$ 。式中 g 为重力场的重力加速度。目前世界各国常用的衡器都离不开两个必须的条件：一是重力场，二是静力平衡。前者说明现代各种衡器都不能用于无重力场的场合；后者说明各种衡器都必须待其保持平衡时才能进行测量。因此，将其称之为静态衡器，所应用的方法称为静态称重法。

随着科学技术的进步，工业生产自动化、数字化、智能化水平的提高，许多工业、商业、运输、物流、公路铁路建设等领域，常常遇到运动中的物体需要称重，或在外界有振动源干扰的条件下需要称重，此时静态衡器就无能为力了。为解决此问题，出现了对称重传感器“静态标定动态使用”的动态称重系统。本文上述分析说明，在动态称重系统中，只有当动态误差为零或在所规定的误差范围

内时, 动态测量结果才与静态性能一致, 否则该称重系统便是非线性的。这就是说在动态称重时, 如果不考虑称重传感器的动态特性, 即使称重传感器的静态性能很好, 也会产生较大的测量误差。因此, 对称重传感器进行“静态标定动态使用”的动态称重方法, 只是以静看动, 其本质还是静态的, 并没有从本质上解决静态称重方法存在的问题。因此, 必须研究、分析称重传感器的动态特性。由于称重传感器可以视为单自由度的二阶线性系统, 其数学模型为一常系数线性微分方程。当微分方程的初始值为零时, 对其进行拉氏变换, 即可得到动态特性传递函数的一般公式。其频率特性可根据传递函数求得, 也可根据过渡过程曲线经过相应的近似计算方法求得, 实际上传递函数和频率特性是可以相互转换的。求称重传感器的传递函数, 实际上就是根据过渡过程曲线来确定固有频率 ω_0 和阻尼比 ξ 的过程, 一般都用比较简单的激励方法, 例如自由落锤的冲击载荷来获得过渡过程曲线。

动态校准的意义还在于, 使称重传感器的生产者能正确标明其产品的性能, 给使用者提供正确选择、合理应用的依据。动态校准的关键是选择好激励源, 输入信号应该是一个标准的激励函数, 以周期函数的正弦波信号, 瞬变函数的阶跃信号为常用。为了获得准确可靠的动态校准数据, 要求测试设备中的所有影响动态校准的环节, 例如典型的输入信号激励源, 动态信号记录设备和数据采集处理系统等, 都应具有很宽的频带。

称重传感器频率特性存在的频响误差, 即频率域内传递函数的误差, 是由其输入、输出系统中各个环节的误差引起的。对于系统误差可做归一化处理, 对于随机误差是如何确定它给动态称重准确度带来的影响, 从测量误差的角度分析产生原因, 以及提出改进措施。

近年来, 动态称重传感器以及动态校准方法的研究取得了较大进展。德国 Seitner(塞特内尔)公司为快速称重研制出 200 型铍青铜称重传感器, 固有频率高, 动态响应快, 独创油阻尼与过载保护装置一体化, 在称量时保证称重传感器衰变时间快, 称量速度高, 工作寿命长。美国 THI 公司为动态称重的旋转式定量包装机研制的 THI-1410 型称重传感

器, 可承受离心力和机械振动。其内部装有特制的粘性阻尼器, 保证称量时有较快的稳定时间和较小的动态称量误差。与动态称重配套的能承受搅拌、振动载荷的新型称重模块, 也在美国 V-BLH 公司研制成功, 并批量生产投放市场, 适应了动态称重技术发展的需要。我国有条件的称重传感器制造企业, 应加强动态称重传感器结构设计、试验测试与应用技术的研究, 为提高我国称重传感器技术水平做出新的贡献。

参考文献

- [1] Dave Coreth, Calibration of Measurement Channels for Structural Dynamics Resting, Sound and Vibration, Vol 17, No.3.
- [2] L.W.Bickle & R.C.Dove, Numerical Correction of Transient Measurements, IAS TRANSACTION, Vol 12, No.3.
- [3] 周旭, 现代传感器技术, 国防工业出版社, 2007 年 1 月.
- [4] 余瑞芬主编, 传感器原理(第二版), 航空工业出版社, 1995 年 8 月.
- [5] 师汉民, 机械振动系统——分析、测试、建模、对策(第二版), 华中科技大学出版社, 2004 年 3 月.
- [6] 宋文绪、杨帆, 传感器与检测技术, 高等教育出版社, 2004 年 1 月.
- [7] 刘九卿, 动态称重法, 航天飞行器结构强度与环境工程, 1990 年, 第 4 期.
- [8] 中华人民共和国国家计量检定规程, 《动态力传感器》, 原国家技术监督局, 1990 年 7 月.

作者简介

刘九卿(1937—), 男, 1960 年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团公司下属中国运载火箭技术研究院第七零二研究所研究员, 享受国务院特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问、中国衡器技术专家委员会顾问, 《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、国家职业资格培训教程《称重传感器装配调试工》, 在有关杂志上共发表学术论文 130 多篇。