

应变式称重传感器的动态特性

中国运载火箭技术研究院第七二研究所 刘九卿

[摘要] 本文分析了动态测力与动态称重;应变式称重传感器用于静态称重与动态称重的根本区别。重点介绍了应变式称重传感器的数学模型、传递函数、动态响应、动态性能指标和动态误差。简要介绍了国内外利用动力试验对应变式称重传感器进行动态校准的几种方法。

[关键词] 称重传感器; 动态称重; 动态特性; 动态响应; 动态校准; 动态误差

[中图分类号] TH715.1 [文献标识码] A

Dynamic characteristics of strain gauge load cell

Article abstract: This article not only analyzes differences between dynamic force measuring and dynamic weighing; but also analyics differencers of strain gauge load cell between using in static weighing and indynamic weighing. This article importantly introduces mathematical model, transfer function, dynamic response, dynamic property target and dynamic error of strain gauge load cell. And then briefly introduces several methods that use dynamic test to process dynamic calibration for strain gauge load cell in domestic and foreign.

Key words: load cell; dynamic weighing; dynamic characteristic; dynamic response; dynamic calibration; dynamic error

一、概述

随着科学技术的进步,工业生产自动化、智能化水平的提高,许多企业对称重计量技术提出了加快称重速度,缩短称重时间的要求,迫切需要解决快速称重、低速动态称重和动态称重问题。

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力值变化。因此对测力传感器的瞬态特性要求较高,即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。因此,本文按测量动态力的技术条件来研究、分析称重传感器的动态特性。

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份,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一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 $H(j\omega)$ 为一常数是不可能的。由于在动态称重过程中, 最为严重的情况是输入的 $X(t)$ 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 $Y(t)$ 能够实时的、无失真的跟踪输入 $X(t)$ 的变化。因此, 必须研究、分析称重传感器的动态特性。

二、动态特性的数学模型和传递函数

动态特性是指称重传感器对于随时间而变化的输入量的响应特性。实际输入随时间变化的形式可能是各种各样的, 只要输入是时间的函数, 则其输出也将是时间的函数。动态方程就是指在动态称重时, 称重传感器的输出与输入之间随时间变化的函数关系。它依赖于称重传感器本身的测量原理、弹性元件结构, 取决于系统内部机械、电气等各种参数, 而且这个特性本身不因输入量、时间和环境条件的不同而改变。通常研究、分析动态特性时, 是根据标准输入特性来考虑并评估称重传感器的响应特性。标准输入主要有正弦变化的输入、阶跃变化的输入和线性输入, 而应用较多的是前两种。

1. 动态特性的数学模型

为便于分析称重传感器的动态特性, 必须建立数学模型。理论分析和大量试验结果证明, 称重传感器可以看作是单一自由度的二阶线性系统, 它的数学模型为一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

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

式中: Y—输出量; X—输入量 (被测量); t—时间

a_0, a_1, \dots, a_n —仅与测量系统特性有关的常数

b_0, b_1, \dots, b_n —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 外, 其余各项 $b_1=b_2=\dots=b_m=0$, 故式 (1) 可改写为

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

由式 (2) 知, 取 $b_0=a_0$ 时, 称重传感器的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_0 X \quad (3)$$

工程上一般都将式 (3) 改写为

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

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

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

2. 动态特性的传递函数

称重传感器动态特性的传递函数在线性或线性化定常 (时间不变) 系统中, 是指初始条件为零时, 系统输出量的拉氏 (Laplace) 变换与输入量的拉氏变换之比。

在称重传感器的一般微分方程式 (1) 中, 当其初始值为零时, 对式 (1) 进行拉氏变换, 即可得到动态特性的传递函数 $H(s)$ 的一般式, 即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (5)$$

式中: $Y(s)$ —称重传感器输出量的拉氏变换式

$X(s)$ —称重传感器输入量的拉氏变换式

根据上述定义, 将微分方程式 (4) 经过拉氏变换即可得出工程上用的传递函数公式。

微分方程式 (4) 的拉氏变换为

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

则传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (6)$$

三、动态响应及动态性能指标

称重传感器的动态响应特性可以从时间域和频率域来分析。通常在时间域,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,并着重从幅频特性和相频特性来分析。

1.时间域瞬态响应特性

当输入量 $X(t)$ 为单位阶跃信号时,则

$$X(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$X(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

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

$$Y = kX(t) \quad (8)$$

式(8)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

$$H(s) = k$$

$$\text{或 } H(j\omega) = k \quad 0 < \omega < \infty \quad (9)$$

在实际测量中,要作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。例如一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。

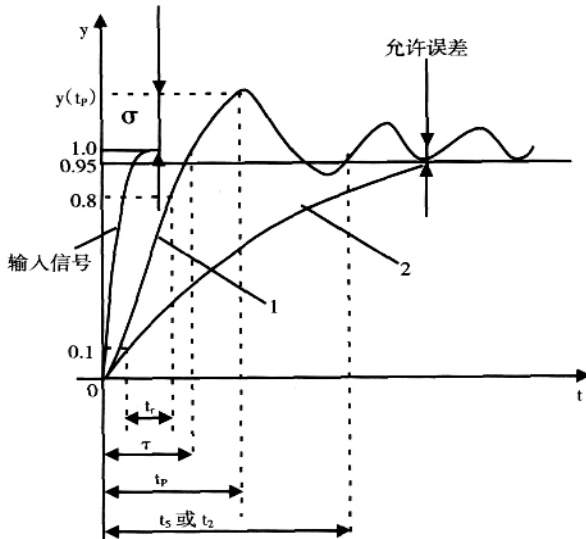


图1 阶跃输入与输出随时间变化曲线

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 ζ 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 ζ 。阻尼比 ζ 直接影响输出信号的振荡次数及超调量 σ 。 $\zeta=0$ 时为临界阻尼,超调量为 100% 产生等幅振荡; $\zeta>1$ 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; $\zeta<1$ 时为欠阻尼,产生衰减振荡,达到稳态输出所需要的时间随 ζ 的增加而减小;在 $\zeta=1$ 时,达到稳态输出所需要的时间最短。工程中通常取 $\zeta=0.6 \sim 0.8$,最大超调量约为 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,输出量的最大值 $Y(t_p)$ 小于 $Y(\infty)$ 时,响应无超调量;在 $Y(t_p) > Y(\infty)$ 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

$$\sigma = \frac{\Delta Y}{Y(\infty)} \times 100\% = \frac{Y(t_p) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\% \quad (10)$$

(5) 衰减度 ψ —瞬态过程中振荡幅值衰减的速度。用下式表示:

$$\psi = \frac{a - a_1}{a} \times 100 \quad (11)$$

2.频率域稳态响应特性

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。

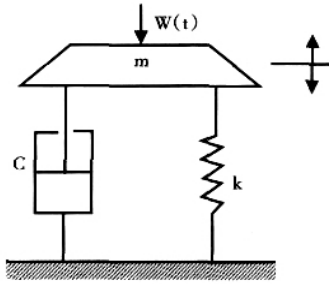


图2 二阶称重传感器

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的响应之和。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。由于不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。

含有质量 m ，弹性元件 k ，阻尼器 c 和被测载荷 $\psi(t)$ 的系统，根据牛顿第二定律其动力学方程式为

$$m \frac{d^2 Y}{dt^2} + c \frac{dY}{dt} + kY = W(t) \quad (12)$$

将式 12) 与式 3) 进行比较，可得

$$a_2 = m, a_1 = c, a_0 = k, Y \text{ 为位移。}$$

则式 6) 可以写成

$$Y + 2\zeta\omega_0 Y + \omega_0^2 Y = k_1 W(t) \quad (13)$$

式中

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

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

$$k_1 \text{—常数, } k_1 = \frac{1}{m}$$

将式 13) 写成一般通用形式，则为

$$\frac{1}{\omega_0^2} Y + \frac{2\zeta}{\omega_0} Y + Y = \frac{k_1}{\omega_0^2} W(t) = KW(t) \quad (14)$$

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

频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (15)$$

幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (16)$$

相频特性为

$$\psi(\omega) = \arctan \frac{2\zeta}{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (17)$$

$$\text{或 } \psi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

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 ζ 。在 $\zeta < 1, \omega_0 \gg \omega$ 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的再现输入信号。因此在设计称重传感器时，必须使阻尼比 $\zeta < 1$ ，固有频率 ω_0 至少应大于被测信号频率 ω 的 3~5 倍，即 $\omega_0 \geq (3 \sim 5)\omega$ 。实际上对固有频率 ω_0 ，要求过高，将增加称重传感器的制造难度，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

$$X(t) = X_m \sin \omega t \quad (18)$$

式中

X_m —输入信号的幅值

ω —输入信号的圆频率

如果称重传感器的动态响应特性非常好，其输出应为

$$Y(t) = KX_m \sin \omega t = Y_m \sin \omega t \quad (19)$$

式中 K 为称重传感器的灵敏度。式 13) 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作正弦变化。

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不可能按式 19) 正弦规律变化，而是按下式作正弦变化，即

$$Y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (20)$$

称重传感器的正弦输入与输出随时间变化的曲线如图 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 $Y(t)$ ，曲线 3 是输出信号 $Y(t)$ 。

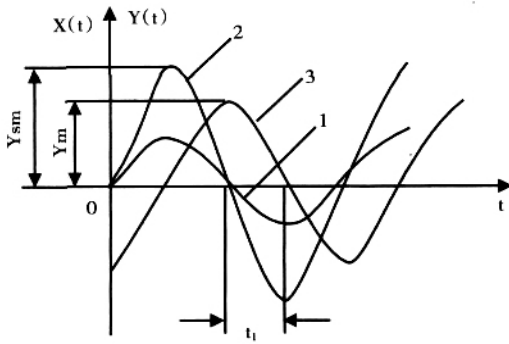


图3 正弦输入与输出时间变化曲线

在校准称重传感器的稳态响应时,可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° 。

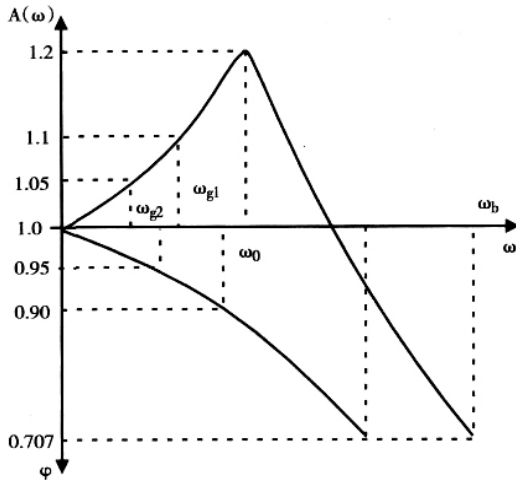


图4 幅频和相频特性曲线

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_g ——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。

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) ζ ; 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。

四、动态校准和动态误差

动态校准(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 ζ , 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。尽管各类传感器的动态校准方法不同,相同的称重传感器也有多种校准方法,但其基本要求是相同的。动态校准时,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校准方法,但在动态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。

动态校准所用的标准激励源主要有两种,一是周期性函数如正弦波、三角波等,以正弦波信号为常用;一是瞬变函数如阶跃信号、半正弦波等,以阶跃信号为常用。

目前,世界各国动态测力与称重传感器的校准,多采用动力校准方法。所谓动力校准法,就是利用动力试验,给测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的校准方法。

在动力校准方法中,利用电动力激励器直接获得频率特性的方法最为先进,我国目前还没有研制这种校准设备。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)。即当激励绕组通以电流时,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,测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的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方法,最大的特点是可以很快的得出测力与称重

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。

美国振动工程与测试技术专家给出了三种动力校准方法:跌落校准、惯性校准和比较校准。

动态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校准的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富里哀分析法,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 ζ 是未知数,必须通过动态校准才能直接求得。在我国按激励源不同有三种激励方法。

(1) 在标准的冲击试验设备上利用冲击载荷获得动态响应的校准方法

这种动力校准方法是利用标准冲击试验设备上的落锤,自由下落时撞击称重传感器的头部(弹性元件的承载部分),由于是高速机械碰撞而产生一个冲击载荷,在这种激励下称重传感器产生相应的过渡过程,用近似的计算方法即可获得它的频率特性。

通过试验测量可以证明,利用落锤实现机械碰撞所产生的冲击载荷波形是半正弦波。其最大幅值与落锤碰撞前的瞬时速度(由落锤下落高度决定)、落锤的质量和称重传感器弹性元件的刚度成正比。因此,可以通过选择不同质量的落锤和落锤的不同下落高度,来获得各种冲击载荷,在很宽的范围内对不同量程的称重传感器进行动态校准。此种动态校准方法比较简单,容易实现,但由于称重传感器动态响应等原因,冲击载荷的波形易发生畸变,以此计算的频率特性误差较大。

(2) 利用激波管产生阶跃载荷获得动态响应的校准方法

这种动力校准方法是利用激波管内气压冲击波对称重传感器施加阶跃载荷。校准时称重传感器的头部对准激波管的低压室出口,激波管与称重传

感器通过法兰盘和密封垫圈紧密连接。当激波管高压室的气体迅速充满低压室时,由于低压室的容积远远小于高压室的容积,在这一瞬间造成压力突然变化,出现气压冲击,便在称重传感器头部的面积上产生阶跃载荷。根据阶跃响应就可以用近似的方法计算出频率响应特性。高压室的静态压力取决于低压室所需要的压力大小,低压室的压力由施加的阶跃载荷和称重传感器头部的面积决定,上升时间取决于高压室向低压室充气的时间。可利用编程通过计算机来计算阶跃响应的频率特性。

受激波管的激波压力限制,很难产生较大的阶跃载荷,一般只能校准1~10t量程范围的称重传感器。对于1t以下和10t以上量程的称重传感器,多采用突然卸载的方法进行动态校准,即先给称重传感器施加一标准载荷,例如将被校准的称重传感器吊装在刚度很大的龙门架上,给称重传感器施加一个标准载荷,利用悬吊加载系统中的爆炸分离装置,在小于10 μ s的时间内突然爆炸释放所加的标准载荷,使称重传感器获得一个负阶跃载荷,达到与激波管产生阶跃响应相同的效果。

(3) 动态校准的比较法

采用上述两种绝对校准法,虽然具有精度较高、可靠性大、能直接参考响应波形等优点,但它所要求的测试设备多,精度要求高,技术难度大,校准时间长等缺点也非常突出,这是动态传感器研究和生产单位必须认真解决的问题。近些年在动力校准实践中迅速发展起来的比较法,越来越受到人们的重视和欢迎。

动态校准的比较法,就是将定期送往国家力值计量检测部门的采用绝对法校准的标准称重传感器及其配套的动态检测仪器设备作标准,与被检的称重传感器动态性能逐项比较进行动态校准。校准时将标准称重传感器与被校准的称重传感器背靠背的安装在中频或高频振动台上,按所要求的频率和动态载荷值进行动态加载,通过比较和分析频率响应曲线等确定被校准称重传感器的动态特性。比较校准方法的特点是简单、快速、精确、省时。

不论那一种动态校准,只有动态性能非常好的称重传感器随时间变化的输出曲线能同时再现输入随时间变化的曲线,即输出与输入具有相同类型的时间函数。实际上由于称重传感器弹性元件的结构,输出信号测量系统各环节引起的误差等,输出

信号一般不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入的差异就是动态误差。

一个具有良好静态特性的称重传感器,未必就一定具有良好的动态特性。因为对于快速变化的动态输入信号,需要称重传感器有较好的动态特性,不仅能准确的测量信号幅值的大小,而且还要测量出信号变化过程的波形。影响动态特性的因素任何传感器都有,只不过是表现形式和作用程度不同而已。称重传感器频率特性存在的响应误差,主要是随机误差,因为系统误差可作归一化处理,因此研究称重传感器动态特性的目的,就是从测量误差的角度分析产生动态误差的原因,以及提出改进措施,提高动态称重准确度。

五、结语

应变式称重传感器用于快速称重、低速动态称重和动态称重时,为保证称重系统的称量准确度和工作可靠性,尽可能的免除各类不必要的误差,必须研究称重传感器的动态特性,并对其进行动态校准,以及必要的环境试验和物理参数测试。

研究、分析称重传感器的动态特性,必须建立数学模型,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的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 ζ 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的标明其产品的性能,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。

美国专家给出的跌落校准、惯性校准和比较校准三种方法,以跌落校准法应用较多,比较校准法相对简单易行,快速省时。

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。对于系统误差可作归一化处理,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 型镀青铜称重传感器,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。

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] 师汉民.机械振动系统——分析、测试、建模、对策(第二版)[C].华中科技大学出版社,2004年3月.
- [4] 宋文绪,杨帆.传感器与检测技术[M].高等教育出版社,2004年1月.
- [5] 余瑞芬.传感器原理(第二版)[M].航空工业出版社,1995年8月.
- [6] 樊尚春.传感器技术及应用[M].北京航空航天大学出版社,2004年8月.
- [7] 项冀平.力传感器的动态性能[M].航天测力与称重计量测试技术研讨会,1990年10月.
- [8] 刘九卿.动态称重法[D].航天飞行器结构强度与环境工程,1990年,第4期.

作者简介:刘九卿,男,71岁,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七二研究所研究员,享受国家特殊津贴待遇的专家。现为中国衡器技术专家委员会顾问,《衡器》杂志编委。在相关杂志上共发表学术论文70余篇。

(作者通讯地址:北京市丰台区桃源里小区11楼2单元6号
邮政编码:100076)

收稿日期:2007-09-27