

有关压力传感器动态校准和 动态性能评价的几个问题

张 挺

(中国科学院力学研究所)

摘要 在本文中,作者根据简单的线性系统分析和实践中的体会,对压力传感器的动态校准和动态性能的评价提出下列几点看法:(1)阶跃压力是较理想的动态校准压力源;激波管可以作为标准动态压力标准装置(微压传感器除外)。(2)压力传感器的主要动态性能指标为:上升时间、超调量、振荡频率或谐振频率、冲击加速度灵敏度。(3)压力传感器的校准可采用静态校准和动态校准相结合的方法,没有必要在整个量程范围内进行动态校准。用“动态灵敏度”来概括压力传感器的动态性能是不确切的。

关于压力传感器动态性能的评价和动态性能指标的确定问题,目前尚未完全统一,这给压力传感器动态性能的鉴定和动态测量误差分析带来一定的困难。作者根据工作实践中的一些体会和简单分析提出一点初步的想法,以期和从事这方面工作的同志们讨论和商榷。

1. 问题所在

压力传感器动态校准的目的是为了获得传感器的传递函数,鉴定它的动态测量品质,以便在使用时分析动态测量误差。

对于大多数工程技术和科研观察用的压力传感器来说,它们是一个线性系统或者是一个可以分段线性处理的系统。一个线性系统的传递函数 $G(s)$ 定义如下:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (1)$$

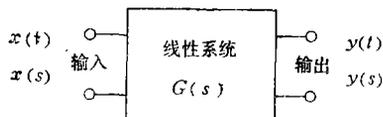


图1 线性系统简图

式中, $x(s)$ 和 $y(s)$ 分别为输入函数 $x(t)$ 和输出响应 $y(t)$ 的拉氏变换。

若 $x(t)$ 和 $y(t)$ 是有界函数,常用频率特性 $G(j\omega)$ 来表征系统的传递函数, $G(j\omega) = y(j\omega)/x(j\omega)$ 。

本文于1980年1月收到。

若一个压力传感器的传递函数为已知, 则其动态性能就可完全确定, 该系统用于动态压力测量时的误差也能精确给出。但是, 动态压力传感器在设计 and 制造过程中很难用分析和计算的方法来确定它的传递函数。通常采用动态校准的方法即: 在压力传感器的输入端施加某一已知的压力函数 $x(t)$, 通过实验获得传感器的输出响应 $y(t)$, 借助于富氏变换, 在频率域展开得到传感器的频率特性 $G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$, 其中 $A(\omega)$ 为幅频特性, $\varphi(\omega)$ 为相频特性。为了数据处理和分析方便, 输入函数采用阶跃函数或脉冲函数。

目前关于动态压力传感器的动态校准方法、动态性能的评价、产品性能例行检验和出厂性能指标等方面说法不一, 给产品的鉴定和使用带来一定的困难。

此外, 还有一种所谓“动态灵敏度”的提法, 希图用“动态灵敏度”来概括压力传感器的动态性能。根据这种观点, 在使用时提出在工作量程范围内进行动态校准的要求, 对计量部门也提出了类似的要求。

根据上述情况, 作者认为, 关于压力传感器的动态性能的评价和主要性能指标的确立等问题, 有待进行深入的讨论。

2. 简单分析

当一个线性系统的传递函数 $G(s)$ 不能解析给出时, 可通过实验来获得。常用的方法是以一个单位脉冲函数 $\delta(t)$ 或单位阶跃函数 $u(t)$ 激励系统, 得到系统的脉冲响应 $g_\delta(t)$ 或阶跃响应 $g_u(t)$, 通过它们可直接获得 $G(s)$ 或 $G(j\omega)$:

若 $x(t) = \delta(t)$, 则 $G(s) = g_\delta(s)$; 若 $x(t) = u(t)$, 则 $G(s) = s \cdot g_u(s)$,

$$G(s) = L \left[\frac{dg_u(t)}{dt} \right] + g_u(0_+)$$

若 $g_u(0_+) = 0$, 则

$$G(s) = L \left[\frac{dg_u(t)}{dt} \right]$$

$$G(j\omega) = \int_0^\infty \frac{dg_u(t)}{dt} e^{-j\omega t} dt = \int_0^\infty e^{-j\omega t} dg_u(t)$$

$$\approx \sum_{n=1}^{\infty} \Delta g_u(t_n) \angle -\omega t_n$$

当系统的脉冲响应或阶跃响应已知时, 一个起始松弛的线性系统对任何激励 $x(t)$ 的响应也可利用褶积积分或叠加积分而完全确定:

$$y(t) = \int_0^t g_\delta(t-\tau)x(\tau)d\tau$$

$$\approx \sum_{\tau=0}^t g_\delta(t-\tau)x(\tau)\Delta\tau$$

或

$$y(t) = x(0)g_u(t) + \int_0^t \frac{dx(\tau)}{d\tau} g_u(t-\tau)d\tau$$

若 $x(0) = 0$, 则

$$y(t) \approx \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau)g_u(t-\tau)$$

综上所述, 对于一个线性系统而言, 用脉冲响应、阶跃响应或频率特性都能描述系统的

特性。三者能相互转换，它们的各个参数之间也存在着——对应的关系。

考虑到动态校准装置在技术上实现的可能性，压力传感器的动态校准大多采用阶跃压力作为激励源。一般测量用的压力传感器多为二阶或一阶线性系统，属于高阶系统的极少。为了讨论的方便，在图2和图3中给出了一阶和二阶线性系统的单位阶跃响应以及阶跃响应品质指标和传递函数参数间的关系。（详见参考文献1、2）

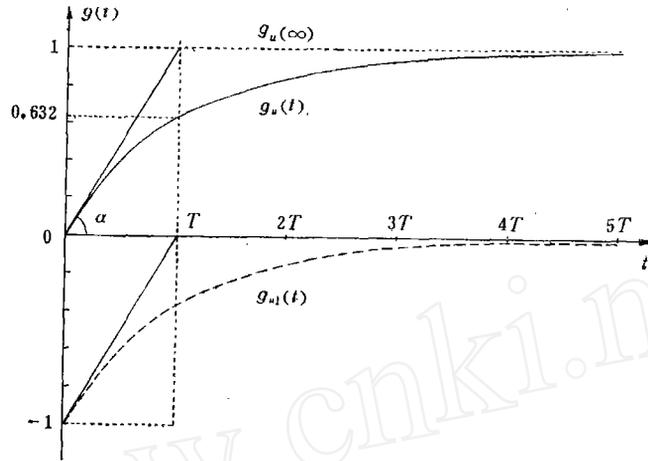


图2 一阶线性系统的单位阶跃响应

$$\text{传递函数 } G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$$

$$g_u(t) = g_u(\infty) + g_{u1}(t) = 1 - e^{-t/T}$$

$$\text{频率特性 } G(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{(T\omega)^2 + 1}} \angle -\text{tg}^{-1}(T\omega)$$

$$\frac{1}{T} = \left[\frac{d}{dt} g_u(t) \right]_{t=0} = -\frac{\ln[g_u(\infty) - g_u(t)]}{t}$$

3. 讨 论

(1) 由上述简单分析得知，无论从数据处理和计算的简便性、动态校准压力源装置在技术上实现的可能性，还是从传递函数参数和阶跃响应品质指标的——对应性来说，阶跃压力都是一个较理想的动态校准压力源。由实验获得的阶跃响应能够完整地得到系统的频率特性，也可以直接由阶跃响应运用叠加积分求得任意输入时系统的响应。

目前在动态校准中使用的压力源还有：正弦压力发生器、周期脉冲压力（如矩形压力脉冲）发生器和各类单次脉动压力发生器。采用正弦压力发生器作为激励源的动态校准，由于目前还较难准确获得相频特性，一般只得到幅频特性。当传感器的工作频率（在非简谐压力测量中应为所考虑的最高次谐波频率）远远小于振荡频率时，即 $\omega \ll \omega_0$ ，则传感器的相频特性近似为线性（参看图3），传感器的动态测量性能和动态测量误差主要取决于幅频特性。而当 $\omega \ll \omega_0$ 条件不满足时，仅由幅频特性来分析传感器的动态性能是不够的。此外，高频、大压力的正弦压力发生器由于技术和工艺上的困难，目前还很难制造，因此，正弦压力发生器作为动态校准压力源有很大的局限性。

至于其他各种脉动压力源，从理论上讲，如能精确地获得输入压力 $x(t)$ 的话，则由实

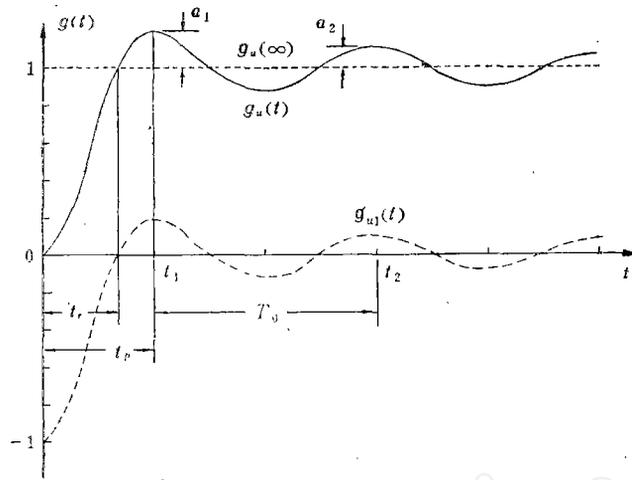


图3 二阶线性系统的单位阶跃响应

$$\text{传递函数 } G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}$$

$$g_u(t) = g_u(\infty) + g_{u1}(t)$$

$$= 1 - e^{-\delta_0 t} \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2} \cos\left(\omega_0 t - \text{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0}\right)$$

$$\delta_0 = \frac{\xi}{T}; \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$$

$$\text{频率特性 } G(j\omega) = A(\omega) \angle \varphi(\omega)$$

$$A(\omega) = \frac{1 + \left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[\left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2 + 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4 \left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \frac{2 \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\delta_0}{\omega_0}}{\left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2 + 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$t_r = \frac{\pi + 2\text{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0}}{2\omega_0} = \frac{T \left(\pi + 2\text{tg}^{-1} \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right)}{2\sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_0} = \frac{\pi T}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$M_p = a_1 \times 100\% = \exp \left[-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right]$$

验测得传感器响应 $y(t)$ 后, 亦能得到系统的传递函数:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt}$$

但 $x(t)$ 在这类装置中需要借助于参考 (或标准) 传感器来测量, 因而 $x(t)$ 函数的准确性

又取决于参考传感器的动态性能。这类装置在使用中也有很大的局限性。

综合上述各点,作者建议将阶跃压力函数(压力发生器为激波管)作为通用的标准动态校准压力源(微压传感器除外)。正弦压力发生器可以作为某些低频压力传感器的校准装置,而其它各类动态压力发生器仅能作为特定情况下的辅助校准装置。

(2) 在压力传感器的动态校准实践中,有时很难用解析的方法得到传递函数。经常是用图表的形式给出传感器的幅频和相频特性。传感器的动态性能指标多数是用谐振频率或自振频率〔注〕来评价,但仅此一指标是不能完整评价的。

文献〔4〕中提出利用传感器的实验阶跃过渡过程曲线求得它的回归传递函数的方法。对于典型的一阶阶跃响应,可由实验响应曲线直接获得传递函数的参数 T 。对于典型的二阶阶跃响应,由实验响应曲线得到的任意两个品质指标(t_r 、 t_p 、 M_p 或 δ_0 、 ω_0)亦能联立解得传递函数的参数 T 和 ξ 。但在激波管实验中有些传感器并不能得到一个典型的二阶阶跃响应。在这种情况下,根据实验测定的过渡响应曲线得到的回归传递函数的回归精度是个问题。

前面曾提到:线性系统的阶跃响应 $g_u(t)$ 本身就表征了系统的动态性能。对于任意输入 $x(t)$,系统的响应为:

$$y(t) \approx \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) g_u(t-\tau)$$

阶跃响应的几个主要品质指标是上升时间 t_r 、超调量 M_p 和振荡频率 ω_0 ,这些也是压力传感器用于动态测量时引起误差的几个主要因素。此外,这几个时间域的指标也比较形象,便于使用者选用。对于生产厂来说,测定这几个指标也较易实现。作者建议一般压力传感器的动态性能指标应给出:(a)阶跃响应由零到100%稳态值时的上升时间 t_r ;(b)超调量 M_p ;(c)振荡频率 ω_0 或谐振频率。采用回归分析法归纳等效的传递函数时,亦应以上述三个指标作为回归指标。此外,考虑到动态测量的使用环境条件,还应给出冲击加速度灵敏度(指在单位冲击加速度作用下压力传感器的输出)。

(3) 一个用二阶系统描述的压力传感器,其运动方程为:

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + D \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = Cx(t)$$

式中: M 为运动部件的等效质量,一般科研和工程中所用传感器的 M 是常量; D 为粘性阻尼系数,在传感器设计中应考虑在工作区段保证线性阻尼(即 D 为常量)的条件; K 为弹性系数; C 为压力输入与输出电量间的转换系数。由上式描述的压力传感器的静态校准灵敏度为:

$$S_s = \frac{y}{x} = \frac{C}{K}$$

在动态压力 $x(t)$ 作用下,传感器的输出为:

$$y(t) = \frac{C}{K} \int_0^t \left[\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right] g_u(t-\tau) d\tau$$

〔注〕谐振频率是指幅频特性产生最大振幅时的频率,而自振频率的定义却不甚统一。

$$\begin{aligned}
&\approx \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) g_u(t-\tau) \\
&= \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) \left\{ 1 - e^{-\delta_0(t-\tau)} \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2} \cos \left[\omega_0(t-\tau) - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0} \right] \right\} \\
&= \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) - \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) e^{-\delta_0(t-\tau)} \cos \left[\omega_0(t-\tau) - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0} \right] \\
&= \frac{C}{K} x(t) - \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) e^{-\delta_0(t-\tau)} \cos \left[\omega_0(t-\tau) - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0} \right] \\
&= y_s(t) - y_i(t)
\end{aligned}$$

其中,

$$\delta_0 = \frac{D}{2M}; \quad \omega_0 = \frac{1}{2M} \sqrt{4MK - D^2}$$

动态灵敏度为:

$$\begin{aligned}
S_d &= \frac{y(t)}{x(t)} \\
&= \frac{C}{K} - \frac{1}{x(t)} \cdot \frac{C}{K} \sum_{\tau=0}^t \Delta x(\tau) e^{-\delta_0(t-\tau)} \cos \left[\omega_0(t-\tau) - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta_0}{\omega_0} \right] \\
&= S_s - \Delta S(t)
\end{aligned}$$

由以上 $y(t)$ 的式子可以看到: 一个二阶线性系统对任意输入 $x(t)$ 的响应由两部分组成, 即稳态分量 $y_s(t)$ 和过渡分量 $y_i(t)$ 。 $y_s(t)$ 表征了系统过渡过程结束后的响应。 $y_i(t)$ 的特性既与系统的动态性能品质指标有关, 也与输入函数 $x(t)$ 的频谱有关。 当 $[\delta_0(t-\tau)] \geq 5$ 时, $y_i(\tau) \rightarrow 0$ 。 该物理现象从二阶系统的阶跃响应 (图 3) 也能看到: $g_u(t) = g_u(\infty) + g_{u1}(t)$ 。 因此企图用一个“动态灵敏度”的参数来概括传感器的动态测量性能是不确切的, 也无法概括。 而利用激波管产生的阶跃压力进行动态校准所得到的稳态灵敏度应与静态灵敏度一致。

目前多数压力传感器都利用气体、液体介质或用电磁法来实现线性阻尼, 因而在工作量程内影响传感器动态性能指标的主要因素是 K 值。 静态校准的结果本身就鉴定了 K 值是否为常量。 若在工作量程内 M 、 D 、 K 值皆为常量, 则传感器的动态性能与压力幅值无关。

综上所述, 作者认为, 对于一个动态压力传感器, 全面鉴定其测量性能可以采用静态校准和动态校准结合的方法: (a) 利用静态压力在整个工作量程 (或允许的超载量程) 内校准传感器的线性精度和其它静态性能指标; (b) 利用激波管产生的阶跃压力进行动态校准, 获得传感器的三个动态性能指标, 而不必在整个工作量程内进行动态校准。

4. 结 论

(1) 激波管装置可以作为标准的动态压力校准装置。 重点工作有三个方: 校准用的激波管的设计和工艺要求的研究; 激波参数测量精度的提高和用于激波波形监测的精密瞬态压力传感器的研制; 数据采集装置和分析方法的研究。

(2) 压力传感器的动态性能指标为: 上升时间 t_r 、过调量 M_p 、振荡频率 ω 、或谐振频率以及冲击加速度灵敏度。 再加上静态校准得到的几项指标: 压力灵敏度、线性误差、迟滞误差、灵敏度—温度系数, 形成了传感器完整的性能指标。

(3) 动态压力传感器的校准可采用静态校准和动态校准相结合的方法, 综合得到传感器的测量性能指标。所谓“动态灵敏度”的提法是一种含糊的提法, 它掩盖了现象的物理本质, 以它作为动态测量数据处理和误差分析得到的结果是不确切的。

参 考 文 献

- [1] 绪方胜彦, 《现代控制工程》, 卢伯英等译, 科学出版社, 1978。
- [2] 郑钧, 《线性系统分析》, 毛培德译, 科学出版社, 1978。
- [3] D. S. Bynum et al., “Wind tunnel pressure measuring techniques”, AD 716617.
- [4] 黄俊钦, 《压力传感器动态标定实验数据处理方法研究》, 北京航空学院科研报告, BH-B 349, 1978。

Some Problems Concerning Dynamic Calibration and Evaluation of Dynamic Behaviours for Pressure Transducers

Zhang Ting

(Institute of Mechanics, Academic Sinica)

ABSTRACT

In this article the author proposes following ideas concerning dynamic calibration and evaluation of dynamic behaviours for pressure transducers according to simple analysis of linear system and experiences in practices; (1) The step pressure is more ideal pressure source for dynamic calibration. Shock tube can be used for standard dynamic pressure calibration equipment except micro-pressure transducers. (2) The major dynamic behaviours of the pressure transducers are rise time, over-modulation amount, vibration frequency or resonance frequency and shock acceleration sensitivity. (3) The calibration of the pressure transducers can employ dynamic calibration method combining with static calibration, it is not necessary to be calibrated dynamically for all range. In addition, it should be pointed out that the concept “dynamic sensitivity” cannot be used to comprehend the dynamic behaviours of pressure transducers completely.