

动态压阻传感器量测系统动态 误差分析

吴玉崑

(1982年7月14日收到)

在简略介绍动态压阻传感器量测系统的基础上,本文着重阐述了用实验手段确定量测系统数学表达式的方法和量测系统动态响应的计算。供工程技术人员进行量测系统方案设计和动态误差分析时参考。

一、动态压阻传感器量测系统简介

该系统是在化爆条件下测量空气冲击波压力的一种新型量测系统。它由力敏传感器(DYC型动态压阻传感器),前置放大器,主放大器,滤波器组成,如方框图1所示。

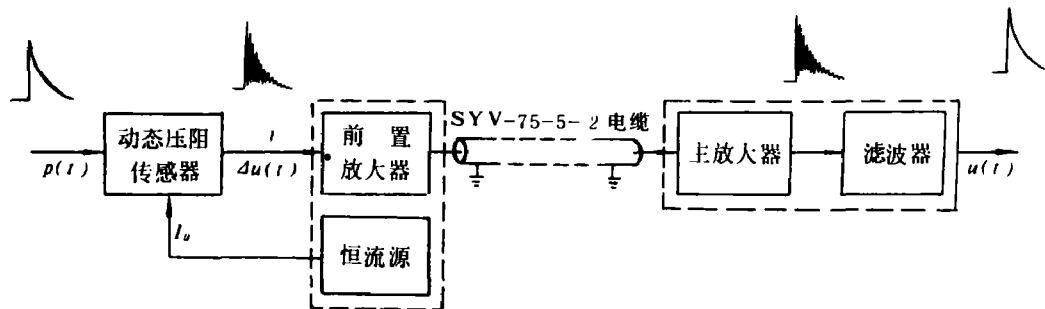


图1 量测系统示意图

在结构上,前置放大器和恒流源制作在一块印刷电路版上,放在一个密封容器内,称前置放大器。主放大器和滤波器制作在一块印刷电路版上,称主放大器,做成插件式插入机壳内。一个机壳有六路主放大器和一个公用电源。

1. 动态压阻传感器

它是测量空气冲击波压力的敏感元件,采用半导体平面工艺技术,在硅片的适当位置扩

散四个等值电阻 R , 构成惠斯登电桥, 硅片和硼硅玻璃基座经静电封接或低温玻璃烧结牢固地结合成一体。电桥由恒流源供电, 当压力作用在硅片上时, 由于硅半导体材料的应变变阻效应, 四个桥臂电阻值发生变化造成电桥不平衡, 即得输出。传感器工作的电原理图如图2所示。图中 ΔR 为桥臂电阻的变化量, Δu 为输出电压, $\Delta u = \Delta R I$ 。

该传感器的输出灵敏度约 $2\text{mV}/\text{kgf}\cdot\text{cm}^2$, 非线性和迟滞误差小, 固有频率高, 稳定性也较好。

2. 前置放大器

它采用XFC-77B型集成运算放大器构成双端输入可变增益的典型应用电路, 其输出为推挽式发射极输出器, 输出阻抗 75Ω 和SYV-75-5-2型射频电缆匹配。

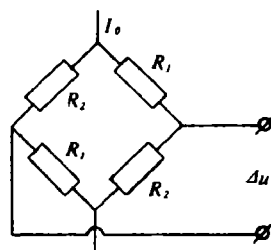
放大倍数50倍, 通频带为 $DC-300\text{KHz}(-3\text{db})$ 。

3. 主放大器

包括输入阻抗为 75Ω 的衰减器与电缆终端匹配, 用XFC-77B型集成运算放大器组成单端输入放大器和有源的三阶布汤滤波器。放大器的放大倍数为20, 滤波器通频带为 $DC-100\text{KHz}(-3\text{db})$ 。

由于传感器的固有频率高而阻尼很小, 化爆冲击波压力作用在传感器上, 传感器电压输出中的高频固有振荡通过滤波器滤掉, 从而得到真实压力波形。系统各环节的输入输出波形见图1所示。

整个量测系统稳定性较好, 非线性失真小, 信噪比高, 具有宽频带, 所驱动电缆长, 动态精度较高等特点。



$$R_1 = R - \Delta R, R_2 = R + \Delta R$$

图2 传感器工作原理图

二、量测系统的传递函数

任何量测系统输出量和被测量的关系取决于系统的动态特性, 而系统的动态特性可用数学式描述。输出量, 被测量和量测系统三者的关系可表示为:

$$\text{被测量} \times \text{量测系统数学式} = \text{输出量}$$

为便于建立量测系统的数学表达式, 我们引入传递函数的概念。所谓系统的传递函数就是初始条件为零时, 输出量的拉氏变换式和被测量的拉氏变换式之比。

例如, 被测量为 x , 它的拉氏变换式为 $x(s)$ 输出量为 y , 它的拉氏变换式为 $y(s)$, 那么

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

$W(s)$ 为系统的传递函数, s 为拉氏算子。

任何一个复杂线性系统都可以分解为一些典型的传递函数的乘积形式, 或者说, 系统各环节传递函数的乘积即为整个系统的传递函数。

用 $s = j\omega$ 代入(1)式, 又得到系统的频率特性。所以, 引入传递函数的概念后, 能比较方便地建立系统的数学表达式。在这里, 我们介绍用实验手段建立系统传递函数的方法。

1. 传感器的传递函数

实验装置如方框图 3 所示。宽带放大器的带宽为 $DC - 1\text{ MHz}$, 放大倍数为 20, TCH-1000 型瞬态变换器采样时间为 $0.1\mu\text{s}$, 回放速度为 2ms/W , 在 SC-18 型光线示波器上描绘出传感器对阶跃信号的响应。

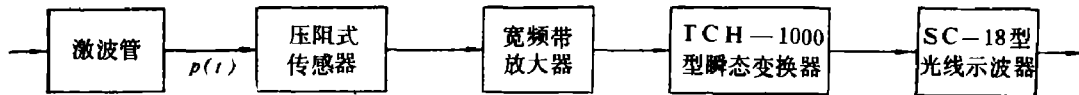


图 3 建立传感器传递函数用装置

对 30 多个传感器做了大量动态特性实验, 都符合二阶振荡的特性形式, 其中 6010[#]传感器的动态特性曲线如图 4 所示。

传递函数的标准式为

$$W(s) = \frac{A}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} \quad (2)$$

A 为传感器的灵敏度系数, 为了便于分析计算结果, 取 $A = 1$; ξ 为阻尼系数; T 为时间常数, 根据响应特性, 其求解公式为

$$\xi = \frac{D}{\sqrt{4\pi^2 + D^2}} \quad \text{而 } D = \ln \frac{B_1}{B_2}$$

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

B_1 和 B_2 为振荡波形相邻的两个振幅值。 f 为振荡频率。多数传感器的 $T = 2.09 \times 10^{-7}$ 秒, $\xi = (0.009 \sim 0.05)$ 。我们取 $T = 2.09 \times 10^{-7}$ 秒, $\xi = 0.009, 0.05$ 两种情况代入 (2) 式, 得到传感器的两种传递函数。

$$W_1(s) = \frac{1}{4.39 \times 10^{-14} s^2 + 3.77 \times 10^{-9} s + 1} \quad (\xi = 0.009) \quad (3)$$

$$W_2(s) = \frac{1}{4.39 \times 10^{-14} s^2 + 2.09 \times 10^{-8} s + 1} \quad (\xi = 0.05) \quad (4)$$

2. 电路部分的传递函数

从前置放大器到滤波器是信号的传递, 综合考虑为一个传递函数, 我们采用测定电路频率特性的方法, 如方框图 5 所示:

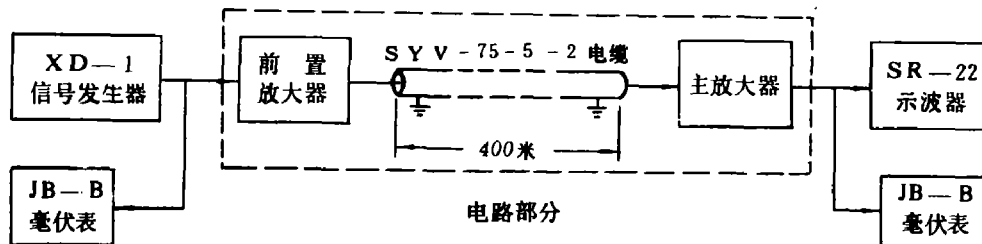


图 5 测电路幅频特性装置

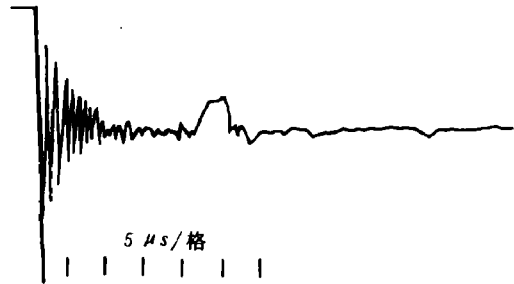


图 4 6010[#]传感器特性曲线

电路部分幅频特性数据见表1和图6所示，把放大器低频段的放大倍数归一化，并用分贝表示。

表1 电路部分幅频特性

| 频率 f (KHZ) | 角频率 ω (1/sec) | 实测数据 (db) | 计算数据 (db) |
|-----------------|-------------------------|--------------|--------------|
| 0 ~ 10.08 | 0 ~ 6.30×10^4 | 0 | 0 |
| 20.09 | 1.26×10^5 | -0.20 | -0.20 |
| 40.09 | 2.50×10^5 | -0.50 | -0.35 |
| 59.90 | 3.76×10^5 | -0.80 | -0.50 |
| 80.00 | 5.00×10^5 | -1.10 | -1.10 |
| 100.02 | 6.28×10^5 | -2.56 | -2.70 |
| 108.13 | 6.79×10^5 | -3.80 | -3.80 |
| 146.80 | 9.20×10^5 | -12.00 | -10.80 |
| 195.20 | 1.20×10^6 | -22.40 | -18.50 |
| 400.00 | 2.50×10^6 | -51.20 | -39.50 |
| 600.00 | 3.77×10^6 | -58.60 | -50.50 |

根据电路部分的幅频特性建立其传递函数的步骤简述如下：

(1) 在半对数坐标纸上画出电路部分幅频特性曲线。纵坐标表示幅值，用分贝数值表示，横坐标为角频率参数，采用对数坐标(如图6)。

(2) 将幅频特性曲线用一些折线段近似，折线段的斜率必须是 $\pm 20 \text{ db}/\text{十倍频程}$ 的倍数。根据这些折线段的转折频率点和斜率，用一些一阶、二阶的典型传递函数的乘积来逼近，即得到电路部分的传递函数，其近似表达式为

$$\begin{aligned}
 W(s) = & 1 / [(1.52 \times 10^{-6} s + 1) \\
 & \times (6.37 \times 10^{-7} s + 1) \\
 & \times (2.31 \times 10^{-12} s^2 + 1.52 \times 10^{-6} s + 1)]
 \end{aligned}$$

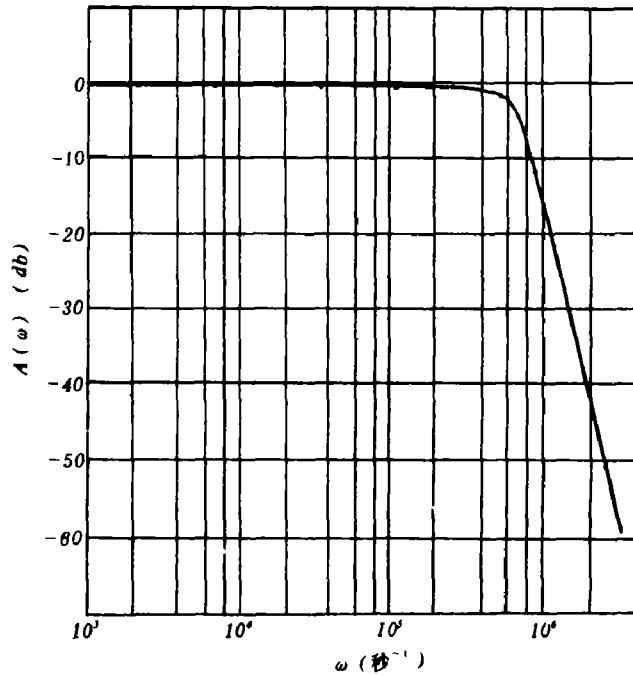


图6 电路部分幅频特性

它所对应的幅频特性数据见表 1 右面部分。与实验数据相比,可看出数学表达式(5)在高频段建立得还不十分精确,至于理论计算和实际系统的动态特性偏差问题,我们在后面还要涉及到,在此就不赘述了。

这样,整个量测系统的传递函数即为(3)式〔或(4)式〕乘(5)式共两种数值式。

三、量测系统动态响应的计算

1. 输入信号的形式

我们选用北京工业学院编写的“爆炸及其作用”一书所推荐的超压波形经验公式作为系统的输入信号的函数

$$p(t) = p_m \left(1 - \frac{t}{T_+} \right) \exp \left(-\frac{a}{T_+} t \right) \quad (6)$$

式中 p_m 为冲击波超压峰值 (kgf/cm^2), T_+ 为冲击波超压正压作用时间 (ms), a 为冲击波超压正压衰减指数。它的波形如图 7 所示

根据“爆炸及其作用”和贝克著的“在空气中的爆炸”一书,我们计算了 $5kg$ TNT 炸药地面爆炸时,在距爆心 2 米和 14 米处的 p_m 、 T_+ 、 a 参数值: 2 米处, $p_m = 11.788$, $T_+ = 2.774$, $a = 17$ 14 米处, $p_m = 0.198$, $T_+ = 7.34$, $a = 2.3$ 。

把这两组参数代入(6)式,作为实际输入参数。

由于在实验室里无法模拟这样的标准波形,所以对后面动态响应的计算结果实际检验有困难。为此,我们采取其他弥补措施,即同时计算了量测系统对阶跃压力信号(7)式的响应,

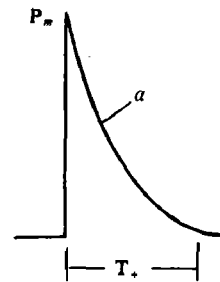


图 7 输入信号波形

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

以便在激波管上校验理论计算的效果。

2. 动态响应的计算

使用 441B-3 型数字计算机,用龙格——库塔法解微分方程。考虑到该机所能表示的最小数为 10^{-12} , 所以,在把上述传感器和电路部分的传递函数公式(3), (4), (5)式进行拉氏反变换来求得微分方程的同时,变换系数的量纲用微秒表示,组成两个系统。

$$I \quad 4.39 \times 10^{-2} \frac{d^2 \Delta u}{dt^2} + 3.77 \times 10^{-3} \frac{d \Delta u}{dt} + \Delta u = p(t)$$

$$2.24 \frac{d^4 u}{dt^4} + 6.45 \frac{d^3 u}{dt^3} + 6.56 \frac{d^2 u}{dt^2} + 3.68 \frac{du}{dt} + u = \Delta u$$

$$II \quad 4.39 \times 10^{-2} \frac{d^2 \Delta u}{dt^2} + 2.09 \times 10^{-2} \frac{d \Delta u}{dt} + \Delta u = p(t)$$

$$2.24 \frac{d^4 u}{dt^4} + 6.45 \frac{d^3 u}{dt^3} + 6.56 \frac{d^2 u}{dt^2} + 3.68 \frac{du}{dt} + u = \Delta u$$

这两组微分方程的输出量和输入量对应图 1 所示的符号。微分方程组的初始条件为零。把阶跃压力信号和空气冲击波超压信号的参数代入微分方程。部分计算结果列于表 2、表 3、表 4 内。表 2 的输入信号为 (7) 式; 表 3、表 4 的输入信号为 (8) 式。表 3 参数取 14 米处的 p_m , T_+ , a 参数值; 表 4 取 2 米处的参数值。

表 2 阶跃信号的输出计算值

| 时间 (μs) | 系统 输出量 | |
|-------------------|--------|--------|
| | I | II |
| 0.6 | 0.0004 | 0.0004 |
| 2.0 | 0.0927 | 0.0902 |
| 4.0 | 0.5331 | 0.5289 |
| 6.0 | 0.9413 | 0.9387 |
| 8.0 | 1.0714 | 1.0714 |
| 8.5 | 1.0720 | 1.0718 |
| 9.0 | 1.0638 | 1.0645 |
| 10.0 | 1.0396 | 1.0399 |
| 12.0 | 0.9957 | 0.9960 |

表 3 超压信号的系统输出信号计算值

| 时间 (μs) | 输入量 | 系统输出量 | |
|-------------------|--------|--------|--------|
| | | I | II |
| 0.6 | 0.1979 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2.0 | 0.1978 | 0.0183 | 0.0178 |
| 4.0 | 0.1976 | 0.1055 | 0.1046 |
| 6.0 | 0.1974 | 0.1861 | 0.1856 |
| 8.0 | 0.1973 | 0.2117 | 0.2117 |
| 8.5 | 0.1972 | 0.2118 | 0.2117 |
| 9.0 | 0.1972 | 0.2101 | 0.2108 |
| 10.0 | 0.1971 | 0.2052 | 0.2053 |
| 12.4 | 0.1969 | 0.1964 | 0.1964 |

表 4 超压信号的系统输出信号计算值

| 时间 (μs) | 输入量 | 系统输出量 | |
|-------------------|---------|---------|---------|
| | | I | II |
| 0.6 | 11.7422 | 0.0051 | 0.0050 |
| 2.0 | 11.6360 | 1.0904 | 1.0604 |
| 4.0 | 11.4860 | 6.2368 | 6.1885 |
| 6.0 | 11.3379 | 10.9338 | 10.9046 |
| 8.0 | 11.1916 | 12.3130 | 12.3153 |
| 8.5 | 11.1554 | 12.2813 | 12.2793 |
| 9.0 | 11.1192 | 12.1441 | 12.1543 |
| 10.0 | 11.0473 | 11.7811 | 11.7858 |
| 12.0 | 10.9048 | 11.1156 | 11.1211 |
| 16.0 | 10.6254 | 10.8284 | 10.8292 |

四、计算结果和讨论

归纳表 3、4 计算数据, 得到下面几点结论:

(1) 两个系统对同一信号的动态响应基本上是一致的。所以, 传感器的阻尼大小对动态响应的影响不大。

(2) 系统对输入信号的响应延迟时间 $t_1 = 0.6 \mu s$ 。

(3) 动态响应的最大压力值发生时间 $t'_p = 8 \mu s$ 。

(4) 动态响应的过冲量

$$M_p = \frac{[\text{最大压力值}] - p_m}{p_m} \% = \begin{cases} 6.9\% & (a = 2.3) \\ 4.5\% & (a = 17) \end{cases}$$

(5) 压力上升前沿 $t_p = t'_p - t_1 = 7.4 \mu s$ 。

(6) 输出量和输入量基本上重合的时间 $t_n = (12 \sim 16) \mu s$ 。

后三点结论是衡量该量测系统在测量化爆冲击波压力时的主要动态误差指标

科学试验是检验理论计算结果正确与否的重要依据。我们在激波管上对 6010 传感器和电

路部分相联结的量测系统做了动态特性试验，波形如图 8 所示。

通过读数得到波形的上升前沿 $t_0 = 6.5 \mu s$ ，过冲量 $M_p = 9.5\%$ 。

与系统对阶跃压力信号动态响应的理论计算结果 ($M_p = 7.2\%$ ， $t_0 = 7.9 \mu s$) 相比较，两者的相对误差是，过冲量为 $(9.5 - 7.2)/9.5 = 24\%$ ，上升前沿为 $(6.5 - 7.9)/6.5 = -22\%$ 。

用这个相对误差修正理论计算结果，得到该系统测量爆炸冲击波压力的动态误差为 $M_p = (5.9 \sim 9.1)\%$ ， $t_0 = 6.1 \mu s$ 。

上面仅对系统的动态误差做了分析，实际上，一个系统的测量误差是由动态误差和静态误差两部分组成的，在数据处理时不可忽视静态误差。

我们进行量测系统动态特性分析还是初步尝试，肯定有许多不足之处，希望读者提出宝贵意见。

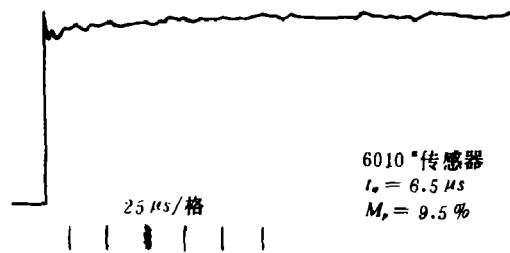


图 8 激波管压力曲线

DYNAMIC ERROR-ANALYSIS OF MEASURING SYSTEM OF DYNAMIC PIEZORESISTIVE TRANSDUCER

Wu Yukun

Abstract

On the basis of general introduction to measuring system of dynamic piezoresistive transducer, the method of determining mathematical expression of measuring system with experimentation and the method of calculating dynamic response of measuring system are especially elaborated in this paper. Engineering-technicians may refer to it when they design a plan of measuring system and make dynamic error-analysis.