

热式流量传感器辨识与数字补偿方法

梁建成 陈吉红 王世民

(精密机械与仪器系)

摘要 本文就改善热式流量传感器的响应特性问题进行了理论与实验研究,指出了模拟电路补偿方法所存在的不足,论述了热式流量传感器的辨识与实验方法,提出了用数字补偿提高其响应速度的方法。研究表明,这种方法是很有效的。

关键词 传感器, 辨识, 流量, 数字补偿

分类号 TH814, TP212

目前,由于常用的浮子流量计具有测量比小、精度低、无法与计算机相连等缺点,因此,我们在滑阀副配磨参数微机控制测量系统^[1]中没有采用它,而是采用了在上述方面都具有良好性能的 LR-3 型热式流量传感器。由于这种传感器是基于热量传递原理工作的,它的热容量导致原理性反应速度慢,若不采取措施改善,对于动态流量测量,是不可能的。因此,改善热式流量传感器的响应特性就成了至关重要的问题。本文就此问题进行了理论与实验研究。

1 模拟补偿方法及不足

为了改善热式流量传感器的响应特性,传感器生产厂家在处理电路中加一阶微分环节来实现传感器的响应补偿,图1是补偿电路图。由图可以推导出:

$$U_0(s) = K(T_1 s + 1) \cdot U_i(s) \quad (1)$$

式中: K ——放大倍数; T_1 ——时间常数(秒); U_i ——输入电压(伏); U_0 ——输出电压(伏);

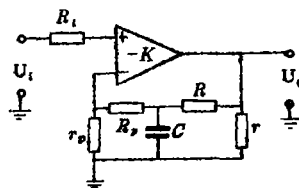


图 1

$$\text{且} \quad K = \frac{r_p + R_p + R + r}{r_p + r}, \quad T_1 = \frac{(R + r)(r_p + R_p)}{r_p + R_p + R + r} \cdot C$$

众所周知,一阶微分环节可使其输出各谐波分量的相位提前,因此,将传感器的输入电压 U_i 通过上述一阶微分环节,并选择适当的 R, C 值,可使 U_0 的响应时间缩短到 3 秒。

但由于(1)式中的 T_1 很大(约等于40秒),电容 C 一般达1000 μF 以上。因大电容漏电阻小,具有附带的电感性,性能稳定性差,以及多个电阻的性能综合影响,故这种模拟电路的响应补偿方法并不理想。笔者在所研制的测量系统中引入计算机,采用数字补偿方法来提高系统的响应,取得了很好的效果。

2 热式流量传感器的辨识与实验

系统辨识是对受控对象施加一定的试验信号,通过测量输入和输出的数据,并对它们进行分析处理,从而辨识出对象的数学模型。对于热式流量传感器,它的输出是电信号,很容易测量。它的输入是气体流量 Q ,则很难找到一种比该传感器精度更高、响应快的测量仪器,准确测量输入流量 Q 。因此,为了方便起见,实验中采用近似的阶跃信号作为输入信号。

系统辨识的方法很多,因输入信号是阶跃信号,我们采用了时域分析法^[2]。该方法是通过测量传感器对阶跃信号的响应——飞升曲线,计算机可自动将其传递函数用一阶系统、一阶带时延系统、二阶系统、二阶带时延系统等来近似,即用下面几种形式来近似:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau_0 s} \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} e^{-\tau_0 s} \quad (5)$$

式中: T ——时间常数(秒); K ——放大倍数; τ_0 ——延时时间常数(秒); ξ ——阻尼比。对于更高阶的传递函数可用带时延的二阶系统来近似。

图2是本文所采用的实验原理框图。在气源开关闭合的瞬间,计算机开始采样,采样周期为 T_0 ,显然气源开关与计算机开始采样存在时间同步问题。若两者不同步,辨识出的传递函数中会出现小延时时间常数的时延环节,这对传感器的传递函数影响不大。

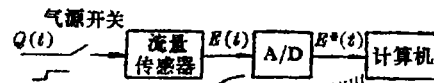


图 2

表1是在不同采样周期,不同采样点数的条件下,计算机辨识的结果。由此可知,热式流量传感器是一阶系统,其标准形式是:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau_0 s} \quad (6)$$

但多次实验表明,其中的时延常数 τ_0 或者为零,或者很小,因而它不是传感器本身所固有的,而是由于实验中气源开关与计算机不同步产生的。因此,热式流量传感器的传递函数应为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} = \frac{K}{39.5264s+1} \quad (7)$$

表 2 给出的是用 $T_0 = 3$ 秒, $N = 120$ 进行实验后, 部分实测的输出值与用辨识出的传递函数进行理论计算的输出值的数据对比, 其中的数据是经过归一化处理后的值, 可见两者误差很小。由此可知, 辨识结果是准确可信的。

表 1

项 目	取 值					
采样点数 N	120	120	180	240	250	250
采样周期 T_0 (秒)	3	3	2	1.5	1	1
系统阶数 N_0	1	1	1	1	1	1
时间常数 T (秒)	39.7564	39.5086	39.7779	39.3990	39.3755	39.3418 ($\bar{T} = 39.5264$ 秒)
延时时间常数 τ_0 (秒)	0	0	0	0.1192	0.0994	0

表 2

时间 (秒)	实测值	计算值	误 差
0	0	0	0
6	0.140845	0.141340	4.95585×10^{-4}
12	0.262365	0.262702	3.37511×10^{-4}
21	0.412054	0.413356	1.30191×10^{-3}
33	0.566001	0.567469	1.46782×10^{-3}
45	0.678677	0.681096	2.41876×10^{-3}
60	0.779233	0.782122	2.88802×10^{-3}
84	0.878218	0.881560	3.34144×10^{-3}
114	0.941396	0.944715	3.34585×10^{-3}
159	0.979692	0.982369	2.67708×10^{-3}
219	0.994104	0.996159	2.05445×10^{-3}
279	0.998362	0.999163	8.00690×10^{-4}
360	0.999934	0.999893	4.16637×10^{-5}

3 数字补偿方法与实验

由上述可知, 热式流量传感器为一阶惯性环节, 且时间常数较大, 响应速度慢。为了改善其暂态性能, 提高其响应速度, 我们采用相位超前环节进行补偿校正, 其原理如图 3 所示。其中 $G(s)$ 是热式流量传感器的传递函数, 如(7)式所示。由于这是传感器本身所固有的, T 随时间的变化, 会有微小的波动。

$G_c(s)$ 是补偿环节的传递函数, 其表达式为:

$$G_c(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (8)$$

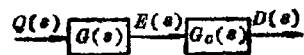


图 3

依据根轨迹的校正法, 须将 $G_o(s)$ 中的零点与 $G(s)$ 中的极点配置成一对偶极子, 以获得满意的暂态性能, 且在改善暂态性能的同时不能影响系统的稳态性能。为此, 取 $T_1 = 39.5264$ 秒, $T_2 = 0.05$ 秒代入式(8), 即

$$G_o(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} = \frac{39.5264s + 1}{0.05s + 1} \quad (9)$$

则系统的总传递函数为:

$$W(s) = \frac{D(s)}{Q(s)} = G(s) \cdot G_o(s) = \frac{K}{T s + 1} \cdot \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (10)$$

这样, $W(s)$ 中的 $-1/T$ 与 $-1/T_1$ 构成一对偶极子 (不能完成对消), 使系统的暂态性能得到改善, 响应速度大大加快, 同时, 由于 $\frac{1}{T_2 s + 1}$ 的存在, 没有影响系统的稳定性。

为得到实用的补偿公式, 将(8)式写为:

$$G_o(s) = \frac{D(s)}{E(s)} = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (11)$$

将上式化为微分方程形式, 则

$$T_2 \frac{dD(t)}{dt} + D(t) = T_1 \frac{dE(t)}{dt} + E(t) \quad (12)$$

写成差分方程形式, 则有

$$T_2 \cdot \frac{D_n - D_{n-1}}{T_0} + D_n = T_1 \cdot \frac{E_n - E_{n-1}}{T_0} + E_n \quad (13)$$

化简(13)式, 得到:

$$D_n = \frac{T_2}{T_2 + T_0} \cdot D_{n-1} + \frac{T_1 + T_0}{T_2 + T_0} \cdot E_n + \frac{(-T_1)}{T_2 + T_0} \cdot E_{n-1} \quad (14)$$

令 $A_1 = \frac{T_2}{T_2 + T_0}$, $A_2 = \frac{T_1 + T_0}{T_2 + T_0}$, $A_3 = -\frac{T_1}{T_2 + T_0}$

则 $D_n = A_1 \cdot D_{n-1} + A_2 E_n + A_3 \cdot E_{n-1} \quad (15)$

式(15)即为实用的数字补偿公式, 在实验中, 取 $T_1 = 39.5264$ 秒, $T_2 = 0.05$ 秒, $T_0 = 2.4$ 秒。

补偿实验方法与辨识实验相同。给传感器输入一个阶跃流量 $Q(t)$, 对传感器的输出 $E(t)$ 采样, 将采样值代入(15)式进行计算, 求出补偿值 D_n 。图4给出了 D_n 与 E_n 的实验曲线, 显然, 经过补偿的输出 D_n 比原输出 E_n 的响应要快得多。

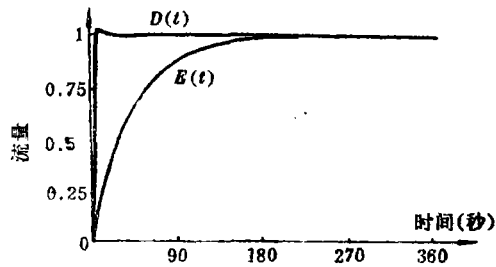


图 4

4 结束语

本文就工程实际问题进行了数字补偿方法的理论与实验研究,解决了滑阀副配磨参数测量系统中的关键问题。本文给出的是一个经过实验验证为可靠有效的数字补偿方法应用的例子。这种方法对于解决热式流量传感器响应速度慢的问题具有普遍意义。

参 考 文 献

- [1] 王世民,陈吉红,梁建成,宁德初.滑阀副配磨参数微机控制测量系统的研究.国防科技大学学报,1991,13(1)
- [2] 孙增圻等.控制系统的计算机辅助设计BASIC程序汇编.清华大学出版社,1986
- [3] 刘植桢等.计算机控制.清华大学出版社,1981

The Identification and Digital Compensation of Flow-Sensor

Liang Jiancheng Chen Jihong Wang Shimin
(Department of Precision Machinery and Instrumentation)

Abstract

Theoretical and experimental research for improving the response of flow-sensor is presented in this paper. First the shortages of analogous compensation are pointed out. Then the identification and experimental method of flow-sensor are described. Finally the digital compensation way for improving response of flow-sensor is established. The experiments are very effective.

Key words sensors, identification, flow, digital compensation