

## 改善电感测微仪二次测量电路精度的措施\*

洪小丽,戴一帆

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**介绍了差动调幅式电感测微仪的工作原理,分析了影响二次测量电路精度的因素,在此基础上提出了利用自稳幅技术以及波形改善技术、全波数字相敏检波技术以及软件部分的数字滤波、线性补偿技术来改善测量精度的措施。实验结果表明,采用上述改进措施,测量精度有了显著的提高。

**关键词:**电感测微仪;数字相敏检波;自稳幅技术

**中图分类号:**TM93 **文献标识码:**A

## Means of Improving the Precision of Measuring the Circuit of the Inductance Sensor

HONG Xiao-li, DAI Yi-fan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The principle of the differential amplitude-modulated inductance sensor is introduced and the factors affecting the precision of the secondary measuring circuit is analyzed. Then some techniques are combined to improve the measuring precision, such as the self-fixed amplitude technique, waveform-mending technique, full digital phase sensitivity detection technique, as well as digital filter and linearity compensation technique in the software. The experiments show that the measuring precision has been greatly enhanced using these techniques.

**Key words:** inductance sensor; digital phase sensitivity detection; self-fixed amplitude technique

差动式电感测微仪是一种建立在电磁感应基础上,利用线圈自感的改变来实现非电量电测的精密测量仪;它由测头和二次测量电路两部分组成,因为其灵敏度、分辨力都比较高,线性特性好且工作可靠、性能稳定,相对于其它测量仪又具有使用寿命长、价格便宜、安装简单等特点,被广泛应用于精密机械制造业、晶体管和集成电路制造业以及国防、科研、计量部门的精密长度测量中。电感测微仪在量具量仪上的应用是比较成功的,但是为了进一步扩大其应用范围,提高产品的质量,就必须对其进行精度分析,改善其精度。

### 1 电感测微仪的工作原理及精度分析

调幅式电感测微仪的二次电路主要包括正弦波生成电路、变压器电桥、交流放大电路、带通放大、A/D采样电路、I/O及计算机部分,如图1所示。

由标准振荡器产生的频率稳定的方波信号,经过积分电路和稳幅电路转换为幅值稳定的正弦波,作为激励电源提供给变压器电桥。当测头检测工件使测杆产生微位移时,电桥平衡改变,输出含有被检测工件位移信息的正弦调幅波,信号经分档交流放大、带通放大后,送到模数转换器,由模数转换器输出的16位并行数据,经过存储器和三态门以及外部程控,分成高低8位读数。

其中正弦波生成电路部分作为整个检测系统的信号源是最关键的环节之一,它的幅值、频率是否稳定将直接影响整个检测系统的稳定性和精度。此外,相敏检波的精度以及信号的交流放大、带通放大等环节都会影响二次检测精度。本文介绍的电感测微仪二次检测电路引入了波形改善技术、自稳幅技术、全波数字相敏检波技术等来改善电感测微仪的检测精度。

\* 收稿日期:2003-01-10

作者简介:洪小丽(1974—),女,硕士生。

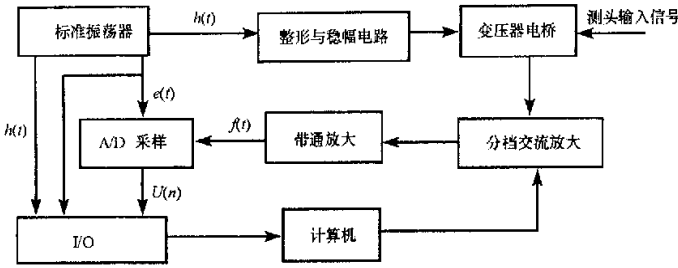


图1 电感测微仪工作原理图  
Fig.1 The operating principle of inductance sensor

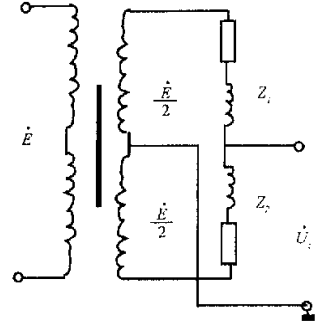


图2 变压器电桥  
Fig.2 The transformer bridges

## 2 正弦波质量的改善

由变压器电桥实现对被测信号的调制,变压器电桥如图2所示,有:

$$U_o = \frac{\omega \Delta L}{2\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} E \quad (1)$$

其中  $R_s$ 、 $L$  分别为两对称电感线圈的铜阻和感抗。由式(1)<sup>[2]</sup>,正弦波信号的幅值  $E$  将直接影响电桥的输出  $U_o$ 。为保证正弦波信号幅值的稳定性以及改善波形质量,采用了波形反馈环和自动增益控制(Automatic gain control)电路来改善波形质量和幅值的稳定性,如图3所示。

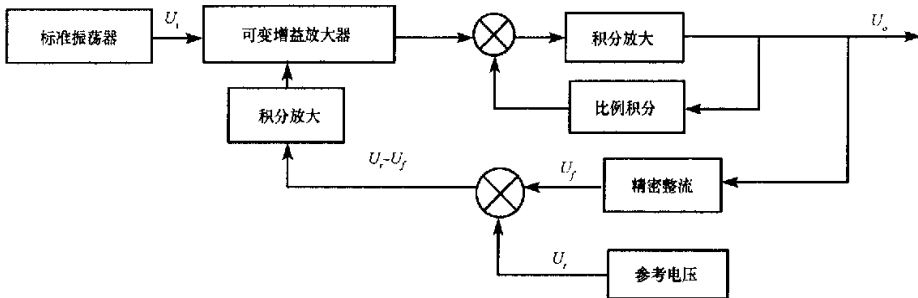


图3 正弦波波形及幅值稳定性改善  
Fig.3 The waveform-mending technique and self-fixed amplitude technique

如图3,由高频二极管和运放组成的精密整流电路将交流电压  $U_o$  取样,经整流后变换为幅值与输出的交流量  $U_o$  成正比的直流电压  $U_f$ ,稳幅放大电路将此  $U_f$  作为幅值反馈电压,并与基准源提供的稳定的参考电压  $U_r$  相比较,取其偏差量  $U_r - U_f$  进行积分放大,以控制可变增益放大器的增益  $K$ 。假设  $K_1$  为波形环节的增益,  $K_2$  为精密整流系数,则系统的静特性方程为:

$$U_o = (U_r - K_2 U_o) U_i K_1 \quad (2)$$

假设由于某种原因使得  $U_o$  的幅值减小,则  $U_r - K_2 U_o$  将增大,从而使  $U_o$  的幅值上升。

为减少波形失真,取输出信号  $U_o$  再进行比例积分后,以负反馈的形式加到输入端,以输入信号与反馈信号的偏差作为其积分放大电路的净输入信号。通过这一较强的负反馈以减少非线性失真,使输出波形尽量接近完整的正弦波。

正弦信号频率的波动引起电感线圈感抗的变化,从而引起输出幅值的波动。对于差动式传感器,只有当电桥完全对称时,频率对输出的影响才能够完全消除。同时由于电路采用同步采样的原理,所以激励源频率的稳定性对测量精度有很大的影响,该电路采用了石英晶体振荡器作为激励源。石英的物理特性十分稳定,而且品质因数高,选频特性好,起振容易,波形失真小,在  $-20^\circ \sim 60^\circ$  的范围内,其频率

的稳定度可以达到  $10^{-7}$ 。由石英晶体振荡器产生 2.4576MHz 的稳定的方波信号,经振荡分频器  $2^8$  和  $2^7$  次分频后产生 9.604kHz 和 19.208kHz 的两路方波信号,分别作为激励信号和采样的触发信号以实现同步采样。

### 3 数字相敏检波技术及实现

#### 3.1 数字相敏检波的原理

传统的测量电路在信号调幅之后都进入到相敏检波电路,由相敏检波器鉴出极性。常用的模拟相敏检波 APSD(Analog Phase Sensitivity Detection)电路由二极管实现,具有线性差、温漂大的缺点,且模拟检波电路检波后的直流信号放大时易受低频噪声、温漂、失调电压及电流等因素的干扰。由此,为减少漂移,采用了能实现高精度的数字相敏检波 DPSD(Digital Phase Sensitivity Detection)技术。

如图 4,经带通放大后的模拟调幅信号  $f(t)$ ,其中中心频率为  $f_0$ ,送入 A/D 转换器进行采样; $e(t)$  作为 A/D 采样的触发信号,其上升沿触发,频率为  $2f_0$ ,相位与  $e(t)$  相差  $90^\circ$ ,因而实现对  $f(t)$  的波峰、波谷采样; $e(t)$  和  $h(t)$  经 I/O 进入计算机,作为调幅信号的波峰、波谷的判断信号,计算机根据检测到的  $e(t)$  和  $h(t)$  进行判断,通过外部程序将  $U(n)$  进行峰值平均,实现全波数字相敏检波。

#### 3.2 全波数字相敏检波的实现过程

##### 3.2.1 对模拟调幅波进行峰—峰值采样

$e(t)$  的上升沿触发 A/D 采样,故采样脉冲对应于如图 4(c)所示的冲激序列  $p(t)$ 。

$$p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi \left[ t - \left( nT_s + \frac{T}{4} \right) \right] \quad (3)$$

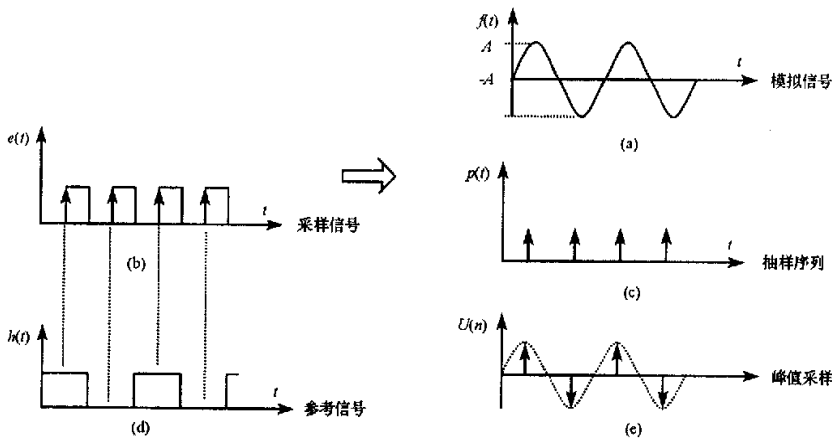


图 4 峰值采样及数字相敏检波的实现原理

Fig.4 The principle of peak sampling and DPSD

由 A/D 输出的数字信号为:

$$U(n) = p(t) \cdot f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A \sin \omega_0 t \cdot \xi \left[ t - \left( nT_s + \frac{T}{4} \right) \right] = \sum_{n=0}^{\infty} A \sin \left[ \omega_0 \left( nT_s + \frac{T}{4} \right) \right] \quad (4)$$

其中,  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T_s = \frac{1}{2} T$ ,  $T$  为调幅波信号频率,由(4)式知:

当  $n = 0, 2, 4, 6, \dots$ ,  $U(n) = \sum_{n=0}^{\infty} A \sin \left( n\pi + \frac{\pi}{2} \right) = A$ , 采到波峰;

当  $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ,  $U(n) = \sum_{n=0}^{\infty} A \sin \left[ n\pi + \frac{\pi}{2} \right] = -A$ , 采到波谷; 其中  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。

##### 3.2.2 波峰、波谷的判断

计算机通过对信号  $e(t)$  和  $h(t)$  的检测来进行波峰、波谷采样的判断。由图 4 知:

$$\begin{cases} e(t) \text{ 上升沿} \\ p(t) = 1 \\ h(t) = 1 \end{cases} \text{ 时, 对应于采波峰; } \begin{cases} e(t) \text{ 上升沿} \\ p(t) = 1 \\ h(t) = 0 \end{cases} \text{ 时, 采到波谷。}$$

3.2.3 峰值平均

为了抑制采样和数字相敏过程中混入的随机噪声,消除由于上下波形不对称引起的误差,对同一信号进行多次重复采样,并对采样数据进行了峰值平均以实现全波数字相敏检波。如图 5,对采样信号进行  $N$  点高速采样, $K$  点和  $K+1$  点为其中相邻两点,设其中波峰幅值为  $A + \Delta A$ ,波谷幅值为  $A - \Delta A$ 。(1)  $K$  点: $e(t)$  上升沿, $h(t) = 1$ ;  $K+1$  点: $e(t)$  上升沿, $h(t) = 0$ ,如图 5(a),则  $g(k) = u(k) - u(k+1) = (A + \Delta A) - (-A + \Delta A) = 2A$ ;(2)  $K$  点: $e(t)$  上升沿, $h(t) = 0$ ;  $K+1$  点: $e(t)$  上升沿, $h(t) = 1$ ,则  $g(k) = u(k+1) - u(k) = (A + \Delta A) - (-A + \Delta A) = 2A$ ,如图 5(b)。

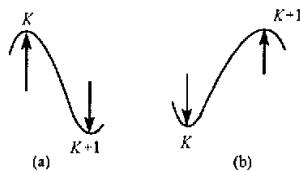


图 5 峰值采样  
Fig.5 Peak sampling

由此得知,采用全波相敏检波对于由于波形不对称引起的误差可以完全抑制。将峰—峰值  $g(k)$  数值平均而得到对应的  $g(n)$ 。

4 结论

将该电路与中原量仪生产的 G-T579 电感测头配合使用组成测量系统,与美国 MTI 公司生产的 AccuMeasure 9000/D2 电容传感器(分辨力为  $0.005\mu\text{m}$ )进行对比实验。标准位移值由电容传感器读出,测量值由电感测量系统测得。得出电感测微系统在  $\pm 20\mu\text{m}$  的测量范围内,其分辨力为  $5\text{nm}$ 。在该量程范围内的输出曲线如图 6,最大非线性误差为  $60\text{nm}$ ,占  $0.015\%$ 。

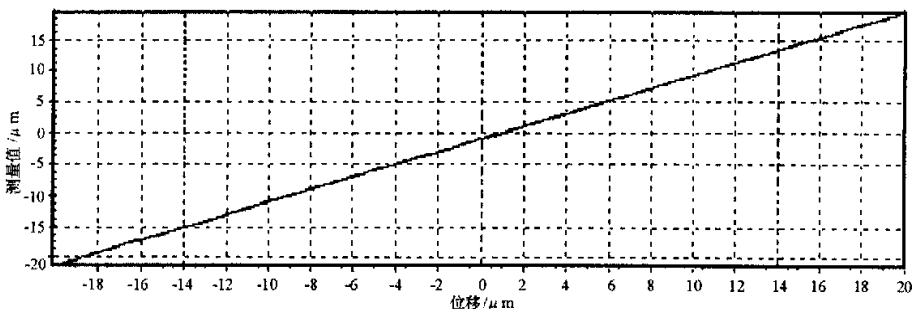


图 6 实验曲线

Fig.6 The experimental curve

为考察传感器的重复精度,在同一位移输入下让电感测微系统进行 20 次测量,记录其输出的数据,并用贝塞尔公式(式(6))计算数据的标准偏差  $\sigma$ ,  $6\sigma$  为数据正态分布的发散度,即代表重复精度。

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

由贝塞尔公式计算得出重复精度为  $12\text{nm}$ 。在  $\pm 20\mu\text{m}$  的范围内观察其零漂为每半个小时  $10\text{mV}$ ,对应的长度为每半小时  $20\text{nm}$ 。

实验结果表明,上述改善措施,实现了电感测微仪二次电路精度的提高,能在精密和超精密测量中应用。

参考文献:

[1] 赵维谦,谭久彬,刘冰峰,等.改善调幅式传感器测量电路精度的措施[J].仪器仪表学报,2001,22(3):247-250.  
 [2] 王化祥,张淑英.传感器原理及应用[M].天津:天津大学出版社,1988.  
 [3] 张国雄,金篆芷.测控电路[M].北京:机械工业出版社,2000.



