

数字式电容测微仪及其精度的提高

秦明暖 李 均

(国防科技大学,长沙 410073)

摘要 本文介绍一种新型的高精度微位移测量仪器—数字式电容测微仪,它可以广泛应用于工件形状误差、尺寸参数的精密测量以及机械振动、冲击的动态测试。本文在误差分析的基础上,提出改进措施,以期提高仪器的测量精度,理论分析和实验表明改进措施是有效的。

关键词: 微位移测量, 测量误差, 频率漂移

1 引 言

如何提高位移传感器的分辨率和精度是我们超精加工中工件形状误差的在线测量的一项关键性技术,它的性能直接影响测量精度,进而影响对工件补偿控制加工的结果。为此,我们专门研制了多路数字式电容测微仪^[1],用于实现非接触式微位移的高精度测量。该仪器精度高、体积小、成本低,且不需 A/D 转换即可直接实现与计算机接口,把它用于工件圆度、圆柱度的在线测量,取得了重复精度分别优于 $\pm 0.02\mu\text{m}$ 、 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 的好结果^[1],这充分证明了仪器的优良性能。该仪器不但能通过位移的测量实现工件形状尺寸的高精度测量,还可用于振动、冲击的动态测试。因此,在精密机械测试与动态补偿加工及状态监控与故障诊断领域中,具有广泛的应用前景。

另一方面,仪器的误差分析结果及临床实验都表明:位移传感器(实现“位移—频率”的转换)的频率稳定性是影响仪器整体稳定性及引起测量误差的主要原因。进一步的分析还表明,如果对仪器作一些改进,充分挖掘潜力,可以进一步提高精度。以下的讨论正是围绕这一主题展开的。

2 仪器的基本原理及误差主要来源

测微仪的原理框图如图 1。

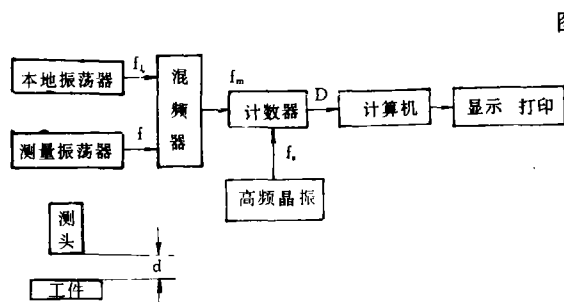
首先,测头端面到工件之间距离 d 的变化 Δd 引起两者间电容量 C 的变化 ΔC ,经测量振荡器转化为频率变化 Δf ;为实现直接的数字输出,经过一级混频,把测量振荡器的高频输出信号变为中频信号(频率为 f_m),其频率变化 $\Delta f_m = \Delta f$;在两个中频周期内,计数器对高频晶振产生的频率为 f_c 的计数脉冲计数,计数值 $D = 2f_c / f_m$,这样 D 的大小就反映出距离 d 的变化。测量的数学模型为^[1]。

$$d = \frac{k}{\left(\frac{Df_0}{Df_0 + Df_1}\right)^2} \quad (1)$$

式中

k : 参数, 通过在已知的初始间隙 d_0 上标定获得

f : 测量振荡器对空 ($d = \infty$), 由测频电路测得



图中 b : 测头端面与工件表面间距离(被测量);

f : 测量振荡器输出信号频率;

f_i : 本振频率(由附测频电路得);

f_m : 混频器输出中频信号频率;

f_s : 高频晶体振荡器产生的计数脉冲频率(固定值);

D : 计数器的计数值。

图1 数字式电容测微仪原理框图

由式(1)可知, 测量精度取决于参数 k 、 f_0 、 f_i 、 f_s 以及计数值 D 的误差。其中 k 取决于标定时用作标准的仪器的精度及操作误差, f_s 来自高稳定度的高频晶体振荡器, 其相对误差小于 10^{-6} , 可以忽略; 测频电路虽可以保证对 f_0 、 f_i 有足够的测量精度, 但 f_0 、 f_i 本身的漂移会带来误差, 它的大小直接取决于两个振荡器的频率稳定度; 而 D 的误差来自计数器的计数误差及中频频率 f_m 的误差, 前者主要靠增大 f_s 来减小, 这受当前计数电路的速度限制, 后者的大小同样主要取决于两个振荡器的频率稳定性。这样, f_0 、 f_i 、 f_s 和 D 的误差都主要取决于两振荡器的频率稳定度。如何提高振荡器本身的频率稳定度, 如何减小频漂对测量精度的影响, 从而提高仪器的整体稳定性的精度, 这将是下面讨论的主要问题。

3 减小频率不稳定产生的误差

3.1 中频误差及其测量精度的影响

由以上的讨论可知, 振荡器的不稳定性所造成的中频频率误差(记为 Δf_m)是测量误差的主要来源, 为此对中频误差 Δf_m 引起的测量误差做近似定量分析。

在微小量程 $d_0 \pm A/2$ (其中 d_0 为初始间隙, 约几十微米, A 为量程, 几个微米,) 范围内, d 与 f 近似呈线性关系⁽¹⁾, 即有

$$d = kf + d_0 \quad (2)$$

式中 k 为参数

$$\begin{aligned} \text{则} \quad A &= d_{max} - d_{min} \\ &= k(f_{max} - f_{min}) \end{aligned}$$

其中 f_{max} 、 f_{min} 分别是正、负满量程时测量振荡器输出的频率

$$\text{又} \quad f_m = f - f_i \quad (3)$$

故又可称 $f_{max} - f_{min}$ 为仪器量程内中频频率的动态范围。

由(2)、(3)知, 若中频误差为 Δf_m , 则由它引起的测量误差为

$$e_{fm} = \frac{A}{f_{max} - f_{min}} \cdot \Delta f_m \quad (4)$$

上式告诉我们:在量程 A 保持不变情况下,增大中频频率的动态范围可以减小中频误差对测量结果的影响,提高测量精度。这一结果是我们选择振荡器类似以及对传感器进行改进的理论根据。

3.2 振荡器类型选择

目前,石英晶体振荡器的频率稳定性最好,一般优于 10^{-6} ,但晶体多用于产生固定频率的信号,只能用与晶体并联负载电容的方法进行频率微调,若用它作测量振荡器,中频输出的动态范围过小(这是由晶体的等效电参数决定的),以致于很小的中频误差所引起的测量误差将是不能容忍的。下面通过计算来说明这一问题。

测头端面与工件表面间的电容

测头端面与工件表面间的电容

$$C = \epsilon S / d \quad (5)$$

这里 $S = 12\text{mm}^2$ 、 $d_0 = 40\mu\text{m}$ 、 $A = 5\mu\text{m}$,则可求出正负满量时 C 的值:

$$C_{\max} = C |_{d=d_0-\frac{A}{2}} = 2.8332\text{pF},$$

$$C_{\min} = C |_{d=d_0+\frac{A}{2}} = 2.4999\text{pF}.$$

其最大变化范围 $\Delta C = C_{\max} - C_{\min} = 0.3333\text{pF}$,

晶体加负载电容 C 以后,其输出频率为

$$f = f_s \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C)} \right) \quad (6)$$

式中 f_s : 晶体串联谐振频率

C_1, C_0 : 分别为晶体串、并联等效电容

这里取一组典型的晶体参数: $f_s = 5\text{MHz}$ 、 $C_0 = 8\text{pF}$ 、 $C_1 = 0.01\text{pF}$ 。利用(6)式可估算量程内频率的动态范围。

$$f_{\max} - f_{\min} = f_s \cdot \frac{C_1}{2} \left(\frac{1}{C_0 + C_{\min}} - \frac{1}{C_0 + C_{\max}} \right) = 73.25(\text{Hz})$$

即使有 $\pm 1\text{Hz}$ 的中频误差(实际除振荡器误差外,还有混频电路及其它干扰因素会引起中频误差),由它引起的测量误差为

$$\begin{aligned} e_{f_m} &= \frac{\Delta f_m}{f_{\max} - f_{\min}} \cdot A \\ &= \pm (1/73.25) \times 5 = \pm 0.068(\mu\text{m}) \end{aligned}$$

这已经大大超出仪器精度允许范围。因此测量振荡器选用频率稳定度较好(调整良好,可达到 10^{-5})的改进型电容三点式振荡电路(即 Clapp 电路)。

考虑到中频频漂 Δf_m 是测量振荡器与本地振荡器的频漂之差(这里忽略了混频误差),即 $\Delta f_m = \Delta f - \Delta f_1$,故选择和测量振荡器完全相同的电路作本振,以期消除部分温漂。实验表明,在相同的条件下,振荡器的频漂方向是一致的。

3.3 增大中频动态范围,减小频漂对测量精度的影响

提高 LC 振荡器的频率稳定度是有限的。在所有典型的振荡器中,Clapp 电路的稳定性要算是最好的,在静态条件下,目前可做到频漂不大于 $10\text{Hz}/20\text{min}$ 分钟(相对稳定性达到 2×10^{-6}),要想进一步提高,比较困难。根据前面的讨论,增大量程内中频频率的动态范围是减小频漂的影响的有效途径。依(4)式,若动态范围增大一倍,则同样频漂 Δf_m 所引起的误差可减小一倍。下面通过公式推导寻找增大频动态范围的途径。

由于 C 值较小,组成谐振回路时,它与一固定电容 C_0 并联,输出信号频率近似为

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L(C_0 + C)}} \\
 &= \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}} \\
 &= f_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon S}{C_0 d}}} \tag{7}
 \end{aligned}$$

式中:

$$\text{则 } f_0 = f_{d=\infty} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}} \tag{8}$$

$$f_{\max} - f_{\min} = f_{d=d_0 + \frac{A}{2}} - f_{d=d_0 - \frac{A}{2}} = f_0 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon S}{C_0(d_0 + \frac{A}{2})}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon S}{C_0(d_0 - \frac{A}{2})}}} \right]$$

由于 $\epsilon S/C_0 d \ll 1$, 对上述括号内两项按二项式近似展开,

$$\begin{aligned}
 f_{\max} - f_{\min} &\approx f_0 [1 + \epsilon S/2C_0(d_0 + A/2) - 1 + \epsilon S/2C_0(d_0 - A/2)] \\
 &= 1/2 \cdot f_0 \cdot \epsilon S/C_0 \cdot A/(d_0^2 - A^2/4) \tag{9}
 \end{aligned}$$

从上述可以看出, 增大 f_0 、 S 或者减小 C_0 、 d_0 都可增大 $f_{\max} - f_{\min}$ 的值, 但是 LC 振荡器的 $\Delta f/f_0$ 很难提高, 使增大 f_0 受到限制, S 增大, 传感器的位置分辨率降低, 而 d_0 过小, 调节起来十分困难, 用于临床测量时容易损坏测头。下面看减小 C_0 时, Δf_m 的变化情况。

依(7)式有

$$f = f_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}} \tag{10}$$

通常 $C/C_0 \ll 1$, 有

$$f \approx f_0 (1 - \frac{C}{2C_0}) \tag{11}$$

两边对 C 微分

$$\frac{df}{dC} \approx -\frac{f_0}{2C_0} \tag{12}$$

故近似有

$$\Delta f_m = -f_0 \frac{\Delta C}{2C_0}$$

也就是说 Δf_m 与 C_0 近似成反比。如果 C_0 减小一倍, 同时增大 L , 保持 f_0 不变, 中频动态范围增大近一倍, 相同的中频误差引起的测量误差减小一半; 同时, LC 回路的 Q 值 ($Q = W_0 L/R = 1/R \cdot \sqrt{L/C}$) 提高, 从这点讲也有利于稳频。但是, C_0 的减小, 也带来一定问题, 表现在:

(1). C_0 减小, 电路分布电容及管子极间电容的不稳定对频率稳定性的影响增强, 特别是连接测头和振荡器的一段电缆, 其分布电容较大, 且极不稳定, 它的存在限制了 C_0 的减小, 我们的改进措施是去掉这段电缆, 实现测头与测量振荡器的一体化。为此, 必须实现振荡电路的小型化, 其关键是电感线圈的小型化。

(2). 减小 C_0 , 为保持 f_0 不变, 需增大 L , 这就给电感线圈的制造工艺提出更高的要求: 在保持积小、 Q 值高的前提下, 增加电感量 L 。

究竟能否解决好这两个问题,在不降低频率稳度的前提下,有效地增大中频动态范围,达到提高测量精度的目的,需通过实验验证。

4 实验情况

4.1 电感线圈的制作

以前采用的是空心线圈,它比较适合 10MHz 以上的频段工作,稳定性也较好,但其体积大, Q 值不高(在 90 左右),电感量也不易做得大些,满足不了我们的改进要求。为此,选用不同型号,各种规格的高频铁氧体作磁芯,对不同匝数的线圈的电感量 L 及 Q 值进行测试,以期作出符合改进要求的线圈。

这里给出用某型号磁芯作出线圈的测试结果,如图 2 所示(测量数据略)。从测试结果看,磁芯线圈比空心的有较大的电感量及较高的 Q 值,同时可以满足小型化的要求。线圈的稳定性如何,需要通过实验进一步验证。

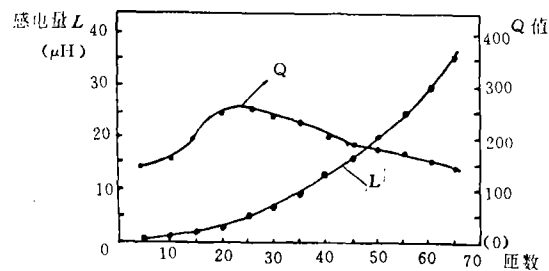


图 2 线圈的 L 、 Q 值随匝数变化曲线

4.2 振荡器稳定性实验

4.2.1 磁芯线圈与空心线圈性能比较

取磁芯线圈与以前所用空心线圈电感量相同,在相同的电路、相同的条件下,同时让振荡器工作,观察记录自输出信号频率变化情况。根据测试结果,磁芯线圈性能优于空心线圈。

4.2.2 确定电感值

逐渐增大线圈的电容量,减小 C_0 (保持 f_0 不变) 观察中频频率的稳定性,找出 L 可能的最大值。实验中, L 增大近一倍,通过对电路精心调试,振荡器仍能保持较好的稳定性。

5 结 论

通过振荡的改进,可以实现测头与测量振荡器的一体化同时,用于临床测量,中频频率漂移不大于 40Hz/h,由它引起的测量误差为 $0.008\mu\text{m/h}$,减小近二分之一,从而提高了仪器的整体稳定性的精度。

参 考 文 献

- [1] Li Jun and Li Hongyan, The Precision Digital Capacitance Instrument for Measuring Micro—displacement and Vibration, The 3rd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnosis Engineering Management (COMADEM), 1991
- [2] Li Jun, Xu Qiuming and Liang Jiancheng, The In-situ Measurement of Roundness and Straightness and Cylindricity, The 3rd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagineering Management(COMADEM), 1991

**Digital Capacitive Micrometer and
Its Accuracy Improving**

Qin Mingnuan, Li Jun

(National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract

This paper introduced a new type micro—displacement measurement instrument which has a high accuracy, called “digital capacitive micrometer”. It can be used for the precision measurement of workpiece shape error and dimensions parameters and the dynamic tast of mechanical vibration and shock. Based on error analysis, improved methods are given for higher accuracy in the paper. Theoretical analysis and experiment show that the improving measures are effective.

Key words: Micro—displacement measurement, Measuring erroe, Frequency drift