

超精密气浮式电容传感器系统*

戴一帆 王新峰 吴宇列

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 介绍了一种高精度、高分辨率的超精密气浮式电容传感器。该系统将具有方形导轨的气浮测头和超小型电容传感器结合在一起,既保证了测头的高分辨率,又体现了电容传感器的高精度、高频响的特点,是一种较好的用于超精密接触测量的测量系统。

关键词 气浮测头,接触测量,电容传感器

分类号 TH702

Ultraprecision Air Bearing Capacitive Sensor System

Dai Yifan Wang Xingfang Wu Yulie

(Department of Mechatronics and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract This paper presents an ultraprecision air bearing capacitive sensor with high resolution. It combines the air bearing gauge head with a square guideway with the microminiature capacitive sensor, ensuring high accuracy and high frequency response. It's suitable for ultraprecision contact measurement.

Key words air bearing gauge head, contact measurement, capacitive sensor

超精密加工和其它一些高精度测量中经常要用到微位移测量技术,测量方法有非接触式的,也有接触式的。目前我们开发的电容传感器可以达到 $0.01\mu\text{m}$ 的精度和 $0.005\mu\text{m}$ 的分辨率,这是一种非常好的用于非接触测量的高精度传感器。对于接触式测量,为了满足高精度和高分辨率的要求,除了要有好的传感器之外,传感器测头有着很关键的作用,本文介绍一种气浮式测头及其由它和电容传感器组成的高精度接触测量系统。

微位移接触式测量传感器可实现高精度的测量,普通接触测量传感器的测头是由滚珠支承或滑动副支承的,测量力一般由弹簧提供,这样的结构使得接触测量的分辨率和精度很难提高。近来被广泛用于超精密加工领域的气浮式轴承具有优良的特性,能够满足超精密测头的各种要求,为此我们研制了一种具有方形导轨的气浮式测头,很好地解决了接触式测量中的一些难题。利用该测头和自研的电容传感器相配(测头还可和其他如电感、差动变压器和光栅等配合使用),基本达到了接触测量条件下测量精度 $0.03\mu\text{m}$,分辨率 $0.01\mu\text{m}$ 的设计要求。

1 空气静压测头设计

空气静压支承几乎没有摩擦并且误差均化效应,非常适用于作为高灵敏度、高导向精度的导轨。空气静压导轨由于零部件制造精度高,制造难度大,目前只在极少数高精度精密设备中选用。相对成熟的是圆截面导轨或尺寸较大的非圆截面导轨的制作技术,方形结构导轨用于气浮测头还不多见,主要原因是方孔和轴之间的配合精度难以保证。我们设计的气浮测头是一种截面尺寸为 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的方形导轨,如果加工精度足够高,就能保证测头的导向精度,且具有很好的防转性能,方导轨方案是较好的选择。

如图1所示,定位测头的空气静压导轨由正方形的导轨(浮子)和正方形的空气静压导套(轴承)两

* 国家部委项目资助
1999年3月1日收稿
第一作者:戴一帆,男,1965年生,副教授

大部分组成。导轨的防转性能主要体现在零部件的制造精度上,根据计算,浮子和轴承孔的各导向面的平面度都要在 $1\mu\text{m}$ 以内,测量力要小于 0.1g ,浮子和轴承各对应边都保持 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的间隙(气膜厚度)。只有浮子和轴承导向各部位尺寸精度、平行度垂直度都达到 $1\mu\text{m}$ 左右才能满足上述要求。

对于浮子的加工,经过努力精度是能够达到的,但是对于空气静压轴承的方孔的加工就显得十分困难了,它已经远远超出了目前机械加工水平,因此实现微型空气静压导轨的制造,必须从整体结构形式及制造方案上另辟新路。我们的主要思路是以装配精度来保证孔轴间的配合要求,而不是靠加工精度来直接保证,实验证明,该方法取得了很好的效果。另外测量力是依靠气浮测头的排气来提供的,利用 SMC 精密调压阀供气,可实现测量力的高度稳定。

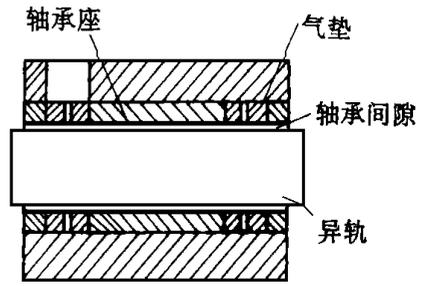


图1 空气静压导轨
Fig.1 The aerostatics guide

2 电容传感器

只要改变气浮测头后面的接口部分,设计的气浮测头可以与多种传感器联接。我们选择的是电容传感器。电容传感器作为一种低成本、高精度、高频响的传感器,应用广泛。作为微位移传感器,它在超精密测量中正得到普遍使用,是实现误差在线测量与补偿的一种性能比较优异的传感器。另外,由于最近我们在电容传感器小型化方面的工作取得突破,也使这一选择成为可能。

我们采用电容微位移传感器是基于变间隙式的原理,在保证两极板面积不变的前提下,并且认为介电常数不变(由于气流的存在,空气的介电常数是有微小变化的,但这种影响在采取措施后可以忽略,我们下面作了一个比较实验,可以证明这一点),使两极板的间隙发生变化,以下简要介绍一下系统原理。

整个测量系统组成如图2所示。



图2 测量系统组成
Fig.2 The composition of measure system

整个测量系统的工作是把位移变化所反映的频率变化再还原为位移值。它不仅包括测头振荡器,还包括一系列的后续处理电路及软件。传感器输出的两路高频信号经过混频器混频后,变成中频信号,再把中频正弦信号整成方波信号,输入到计数板中,由高频晶振对其进行计数,测出其周期,计数板插在计算机中,用计算机可直接读数。

计数板读出的数值与电容板间的间隙的关系为(c_1, c_2, c_3, c_4 为系数):

$$d = c_1 + c_2 \frac{1}{T_n} + c_3 \frac{1}{T_n^2} + c_4 \frac{1}{T_n^3} + \Lambda \tag{1}$$

3 测量系统标定

测量装置如下图3所示,我们是把传感器固定在一个微动台架上,下底板上移,使板间间隙缩小,电容值发生变化,测量位移值。

3.1 空气流动对介电常数的影响

在标定之前,我们先进行气流对空气介电常数影响的实验。

(1) 不通气状态下电容传感器特性

不通气状态下的测得计数值 T_n 与位移的关系见表 1, 作曲线如图 4。

表 1 计数值与位移的关系(1)

Tab. 1 The relation of count and displacement (1)

位移	0	10	20	30	40	45	50	55	60	62	64
计数	2500	2620	2782	3028	3384	3650	4067	4650	5620	6393	7625
位移	66	67	68	69	70	71	72				
计数	8665	10127	11737	14614	18515	32000	63208				

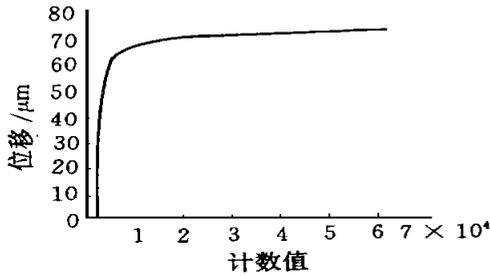


图 3 测量装置

Fig. 3 The measuring installation

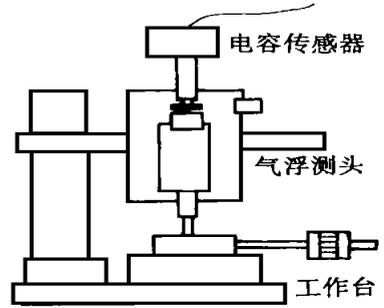


图 4 计数值与位移的关系(1)

Fig. 4 The relation of count and displacement (1)

从图 4 可以看出, 位移与计数值呈多次多项式关系。随着位移的增加, 计数值的增量逐渐加大, 到 $70\mu\text{m}$ 以上时, 位移增加很小的量; 计数值增加非常大, 此时, 很不稳定, 测量已没有意义。在 $50\sim 70\mu\text{m}$ 时, 分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 以上, 且精度高。在 $50\mu\text{m}$ 以下, 分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 以下, 精度为 μm 级, 也可以用来测量。

(2) 通气状态下电容传感器的特性

我们在装置不改变的情况下, 立即给气浮测头通上气, 然后与不通气状态下同样的进行, 读数结果见表 2。

表 2 计数值与位移的关系(2)

Tab. 2 The relation of count and displacement (2)

位移	0	10	20	30	40	45	50	55	60	62	64
计数	2500	2623	2793	3039	3415	3697	4119	4767	5842	6651	7625
位移	66	67	68	69	70	71	72				
计数	9184	10709	12719	15930	22679	37677	63208				

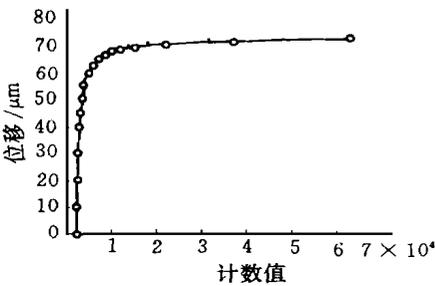


图 5 计数值与位移的关系(2)

Fig. 5 The relation of count and displacement (2)

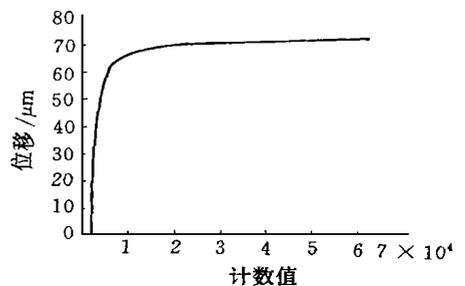


图 6 曲线比较

Fig. 6 The comparison of curve

结果如图 5 所示, 将图 4 和图 5 放在一起见图 6。

其中画“+”的为不通气前的曲线, 画“0”的为通气后的曲线, 发现两者基本吻合, 只是大于 $65\mu\text{m}$ 时, 点偏离比较大, 但此时, 已脱离测量范围。说明通过采取适当的措施, 气流对传感器精度的影响不大, 可以忽略这种影响。

3.2 标定实验

标定是把传感器的频率值与位移值对应起来,确定它们之间的数学关系,但这并不表示电容传感器已经是准确无误的测量仪,在它被当作标准的测量仪器前,必须要先确定其本身的各项静态指标,如重复性、迟滞性、非线性以及综合精度。要最终确定这些指标,就要到标准计量站进行标定。对电容传感器标定,就必须有精度高于或等于这种仪器的另一种量仪作为基准。我们利用实验室现有精度最好的西德电感测微仪,其分辨率最高为 $0.01\mu\text{m}$,量程为 $\pm 20\mu\text{m}$ 。标定的方法就是把电容传感器和西德电感固定在微动台架上,中原量仪厂生产的微位移结构,采用螺旋与斜面相结合方法可以实现 $0.2\mu\text{m}$ 的准确进给。标定时把电容传感器与电感测微仪同时对着工作,调节微动台架,逐渐改变工件与电容传感器测头的间隙,分别读出电容的频率计数值和电感测微仪的值,根据量程与分辨率,选择不同的位移间隙,记录一组数据,然后进行拟合,我们进行 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$ 两种分辨率的标定。这里只给出 $0.01\mu\text{m}$ 分辨率的标定结果。

当分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 时,传感器量程只有20多 μm 。实际标定 $20\mu\text{m}$,每隔 $2\mu\text{m}$ 标定一次。结果见表3。

表3 标定结果(1)

Tab.3 The sequence of demarcating(1)

电容读数	0	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
电感读数	13.46	9.39	5.38	1.44	- 2.53	- 6.58
相对值	0	4.09	8.09	12.06	16.03	20.05
二者差值	0	- 0.09	- 0.09	- 0.06	- 0.03	- 0.05

上表中电感读数的相对值与电容读数之差最大已达到了 $0.1\mu\text{m}$,对于 $0.01\mu\text{m}$ 的分辨率来说,这是比较大的误差。其误差原因是由于存在非线性拟合误差和电感测微仪本身的误差。降低测量范围,如只采用 $5\mu\text{m}$ 的量程,标定后再对其进行精度测试,结果见表4,显示传感器的精度已提高很多,误差的最大值降至 $0.03\mu\text{m}$,达到可以实用的程度。事实上,在这么小的量程范围内,非线性已经比较小了,非线性拟合误差也变得比较小,而另一项误差原因,即电感测微仪的误差就相对比较大。由于电感测微仪的最高分辨率只有 $0.01\mu\text{m}$,其精度和重复性误差一般有几倍的分辨率,故对电容传感器标定产生 $0.03\mu\text{m}$ 的误差是完全有可能的。实际上标定后的电容传感器的精度要高于 $0.03\mu\text{m}$ 。

表4 标定结果(2)

Tab.4 The sequence of demarcating(2)

电容读数	0.48	1.50	2.52	3.51	4.04	4.53
相对值	0	1.02	2.04	3.03	3.56	4.05
电感读数	10.67	9.67	8.66	7.65	7.14	6.63
相对值	0	1.00	2.01	3.02	3.53	4.04
二者差值	0	0.02	0.03	0.01	0.03	0.01

4 结论

通过实验我们得出结论,所设计的气浮测头性能良好,在测量中表现出较高的分辨率,其测量力基本可控制在 $0.1\sim 100\text{g}$ 之间。电容传感器可以和气浮测头联接使用,整个测量系统具有较高的分辨率和测量精度。同时电容传感器的高频响特性低成本也传给了所设计的测量系统。

参考文献

- 1 何雅全,吴明根.超精密加工技术基础,1993
- 2 王化祥,张淑英.传感器原理及应用.天津:天津大学出版社,1989.9
- 3 蔡萍,沈生培.一种高精度大位移电容式位移测量系统.计量学报,1994.7
- 4 吴宇列.超精密电容微位移传感器关键技术的研究[硕士学位论文].长沙:国防科技大学机械电子工程与仪器系,1996