

用电容法测量微振动位移

朱进生 宁静娴 傅仙罗

(中国科学院力学研究所)

本文介绍了微振动位移非接触测量的电容法,讨论了方法的原理,测量电子学和有关的技术问题,测量中采用小尺寸的电容位移探测头,同样获得了高的灵敏度,精密的滤波技术,使得所测振动的上限频率达 7kHz。实验结果证明,这一方法是可靠的。

微振动位移的非接触动态测量,在磁盘机、微小位移、变形度及机械振动(如转轴等)的测量中有极其广泛的应用。

非接触的电测法——电容法。采用的拾振器是电容传感器。电容传感器的优点是非接触测量,具有高分辨率,对被测物的反馈很小。常规的电容传感器虽然也是做成非接触的,但由于这些拾振器的面积较大,结果所测得的振动位移信号只是在传感器面积内的平均值。为了得到每一点的振动位移值,我们大大地缩小了传感器的电极直径,并采用了带有电位控制的保护环及相应的传感器电子学技术,使得在较大的测量范围内,具有高的分辨率和灵敏度。

一、测量原理

根据平行板电容器的原理,一电极 A 与距离为 d 的导体表面所形成的电容 $C(d)$,可近似地描述为

$$C(d) = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad (1)$$

其中 ϵ_0 为空气介电常数, A 为电极面积, d 为待测距离。由此可见,如果采用直接测量电容 $C(d)$ 来确定距离 d 的办法,则 $C(d)$ 与 d 的关系为一双曲线关系,它是一种非线性关系,因而会给测量带来较大的误差。

另外,由于待测电容 $C(d)$ 的电容量很小(约 10^{-13}F 左右),而外部电场的干扰及杂散电容的影响,将会淹没被测电容 $C(d)$,成为不可

忽略的因素。

为了避免非线性误差的影响,我们采用了电容反馈法。将待测电容 $C(d)$ 置于高增益运算放大器的反馈回路中,对其进行放大,如图 1(a) 所示。当运算放大器的开环增益 $(-A)$ 为无限大,其输入阻抗 r 很高时,输出电压与输入电压的关系为

$$V_0 = -\frac{C_i V_i}{\epsilon_0 A} \cdot d = K \cdot d, \quad (2)$$

即输出电压 V_0 与相对距离 d 的变化完全是线性关系,从而在原理上避免了非线性误差影响。

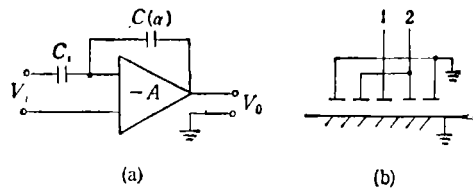


图 1

(a) 测试原理图; (b) 带有等位环的传感器

为了减小外部电场的干扰电压和消除杂散电容的影响,一般的电磁屏蔽在这里是不适用的。杂散电容 C_0 的影响是通过安置一个叫做防护环的电极 2 [图 1(b)] 来减小^[1]。电极 1 和电极 2 各自与地之间的电容以及它们之间的电容分别为 C_1 , C_2 和 C_{12} , 如果忽略损耗,则电极 1 和地之间的全部电容 C_g 变成

$$C_g = C_{12} \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) + C_1. \quad (3)$$

若电极 1 和 2 是等电位的,即 $U_2 = U_1$, 则杂

散电容的影响可以被消除。利用有限元方法^[1]作计算机模拟,可以算出防护环对电场的影响,由电场图可以看出,应用防护环可以得到电极 1 和被测表面之间的均匀电场。

二、测量电子学问题

为了得到振动随时间变化的规律,可以用不同的方法将原始振动信号取出。我们的实验中采用对高频载波调幅的方法。如前所述,如 V_c 是一恒定振幅的高频载波正弦信号源,传感器所拾取的振动位移信号是对信号源进行调幅,其输出信号与位移量的变化是线性关系。

在解调技术中,应用了切比雪夫型及贝塞尔型三阶有源低通滤波技术^[2]及优良的线性集成固体组件电路,使得被测信号的频率范围在连续的情况下为 5Hz-7kHz。

三、实验

为了保证测试精度及设计要求,实验前需进行静态及动态标定。静态标定是在高精度微动工作台上进行的,动态标定是用标准振动台及激光的方法,由中国计量科学研究院标定。我们采用上述传感器及传感器电路,对振动幅值范围小于 $70\mu\text{m}$,主轴转速为 3600 转/min 的标准金属盘片进行测试实验。实验装置框图如图 2 所示

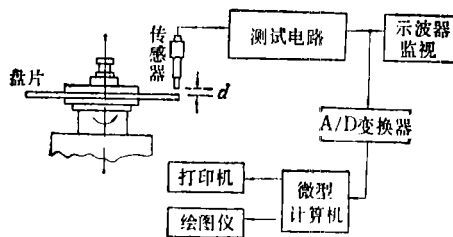


图 2 实验装置框图

以直径为 $\phi 1.7\text{mm}$ 的探测头为电容传感器的一个电极,待测金属盘片为电容的另一电极。传感器所拾取的振动位移信号经测试电路转换成电压信号输出,由 A/D 变换器采集,送

入微机系统对所测位移变化信号作实时数字化处理,再由打印机打印出结果,并在 X-Y 绘图仪上绘制位移随时间变化的曲线,如图 3 所示。

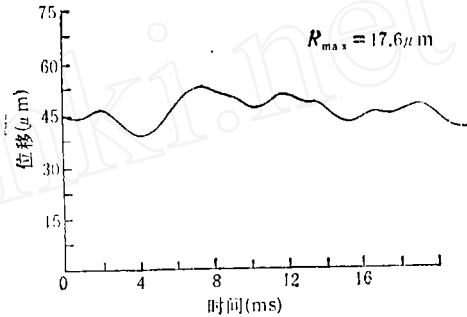


图 3 位移-时间曲线

由图 3 可以看出,位移曲线的变化周期为 16.67ms ,与主轴转动周期符合。说明盘片的轴向振动主要由主轴部件引起,这与理论分析是一致的。所测标准盘片的振幅最大值符合国际标准的规定,测试灵敏度达到 $100\text{mV}/\mu\text{m}$,配用高分辨率的数字电压表头,可使测量下限达 $0.01\mu\text{m}$ 。

采用电容位移传感器及相应的测量电路,对微振动位移作非接触测量的方法表明,应用等位防护环,结合采用传感器及有关的测量电子技术,可使测量范围大为扩大,采用小尺寸的探测头直径亦可得到较高的振动位移灵敏度和分辨率,杂散电容的影响可以减到最小。实际测量结果达到的线性测量范围为 $70\mu\text{m}$,非线性误差为 0.5% ,灵敏度为 $0.01\mu\text{m}$,分辨率为 $0.05\mu\text{m}$ 。精密的解调技术可使测量振动频率分量高达 7kHz 。应用微机系统作实时数据处理,大大提高了数据处理速度,使测试工作更加方便、可靠。

- [1] W. Rimkus, IMEKO 9th World Congress, (1982), 197.
- [2] M. V. K. Chari and P. P. Silvester, Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems, New York, (1980).
- [3] (美)斯图特著,张保栋等译,运算放大器电路设计手册,人民邮电出版社, (1983).