

一种新型的电容传感器 ——基于边缘效应原理的传感器

李欣欣 李 均

(国防科技大学, 长沙 410073)

摘要 本文介绍了一种新型的电容传感器。它不同于以往的平行板式电容传感器, 而是利用边缘场效应的原理, 设计出的具有宽的静态测量范围 (mm 级) 和高精度的测量仪器。它适用于自动化加工过程中的实时测量, 具有快速、稳定和小尺寸的特点。文中对这种测量方法的原理, 数学推导及实验进行了详细地描述。实验结果表明: 这种边缘场电容传感器具有广泛的应用范围。

关键词: 边缘场; 电容传感器; 陶瓷材料; 测头

1 引言

随着科学技术的不断进步, 机械加工工业、航天、航空、航海及精密仪器仪表等部门, 对于表面轮廓、零件尺寸、深孔形状、表面加工裂纹缺陷等方面的测量技术要求越来越高。尤其是加工过程中高速、在线尺寸的测量已成为自动化加工监控与检测系统的关键。当测量速度跟不上加工过程时, 自动化加工的优越性就丧失了。目前用于检测加工精度参数的传感器已有多种, 并且具有较高的实用性, 但就国内、外用于加工质量检测、监控的快速实用化测试手段而言, 日益需要一种具有非接触测量、高精度、相对宽范围、高空间分辨率、小尺寸、低成本和方便使用等特性的测量仪器。电感式传感器 (例如差动变压器) 已被普遍使用, 但其测头与工作表面相接触, 测量时容易划伤工件表面; 近来, 利用光纤技术形成的微位移传感器是一种非接触高速度测量仪器, 但不方便的是其光学装置较复杂, 并且容易受切削液和金属屑等的污染; 另外, 还有一种气动式传感器, 但其频率响应较低; 传统的电容传感器把金属电极与导电体表面平行放置, 使其保持很小的间距来进行测量, 随着距离的增大, 电容迅速降低, 这样就使其测量范围很小, 并且测头作用面积较大, 使横向分辨率受到限制。本文所介绍的就是一种能够解决上类问题的新型传感器。目前, 国外已经研制出此类传感器, 并将其用于表面轮廓、圆柱形零件直径和波音飞机公司航空紧固件深孔的测量, 而国内尚未有这方面研究工作的文献报导。因此, 对这种传感器的研究与设计是十分有意义的。

2 设计原理

2.1 理论依据

根据电磁学原理，当一个很薄的极板和另一个极板垂直放置且保持一定间隙时，若在两极板间施加电压，则两极之间将形成一个电场，称为边缘场，如图 1。根据镜像原理及复变函数理论，可以建立极板间电容和极板间隙之间的数学关系^[4]：

$$C = \frac{4\epsilon W}{\pi} \ln \frac{2H}{h} \quad (1)$$

其中 h 为两极间距离； H 为垂直电极的高度； W 为垂直电极的宽度； ϵ 为封装电极的片基的介电常数

当极板间距离发生微小变化时，电容量就产生比较大的变化。

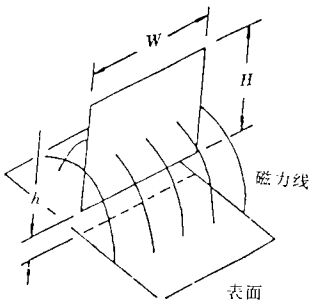


图 1 垂直电极的边缘场

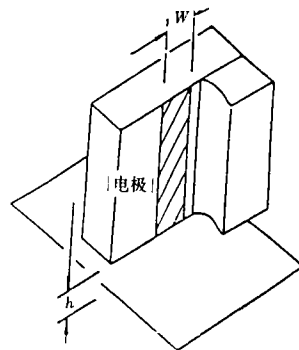


图 2 陶瓷封装的电极

2.2 设计方法

边缘场电容传感器是由一薄的窄条电极与测量表面垂直放置而形成的。电极很薄，只有 $0.1\mu\text{m}$ ，它由薄片厚的陶瓷材料作为封装基片，如图 2。采用陶瓷片封装主要有以下两种作用：

(1) 由于陶瓷不易变形，介电常数可以选择多种，漏磁性能好，这样所设计的测头被完全封装后，就可免受外界污染，并且不易受磨损，使传感器测量精度在恶劣环境条件下受到的影响也很小。

(2) 制成的测头不再需要其它的保护外层。当测头沿着工作表面运动时，可使测头与被测表面保持一定间隙。

对于信号处理技术目前已很成熟，许多文献资料中都有这方面的详细介绍。一般是首先将传感器感受到的距离变化转变为频率，再经鉴频器、滤波器组成的频率/电压转换电路的转换，以电压幅度变化形式输出。另一种是考虑到频率可看作单位时间内脉冲个数，是数字量，这样经过数字采样电路得到一定的计数值，直接送入计算机进行处理，获得传感器的特性参数。

本传感器是将电容值转化为频率值，该值与被测距离相对应。

3 性能参数

3.1 灵敏度

对电场分布进行分析可以得到传感器的灵敏度。由(1)式可得,当初始间隙为 h_0 时测量电容的灵敏度为:

$$K = dC/dh|_{h=h_0} = -4\epsilon W/(\pi h_0) \quad (2)$$

其中, K 与电极的宽度 W 成正比,与初始间隙 h_0 成反比,而与电极的高度 H 无关。

由(2)式可以看出,随着 h_0 的减小,灵敏度增加。

下面我们把边缘电容传感器的灵敏度与平行板式电容传感器的灵敏度来比较一下。

平行板式电容传感器电容为:

$$C' = \epsilon s/h' \quad (3)$$

其中, ϵ 为两极板间介质的介电常数, s 为测头作用面积, h' 为两极板间距离

那么,灵敏度为:

$$K' = dC'/dh'|_{h=h_0'} = -\epsilon s/h_0' \quad (4)$$

比较(2)和(4)式可看出 K 与 h_0 成反比,而 K' 与 h_0' 成反比,因此当初始间隙 h_0, h_0' 变大时,本传感器的灵敏度比传统的平行板式电容传感器的灵敏度降低得慢,所以在间隙变化范围较大的场合下用时本传感器更适合。

3.2 空间分辨率

传感器对测头与被测表面距离之间的变化反应最灵敏。除此之外,电容测量值也受周围电场分布情况的影响。传感器空间分辨率是由任一被测点周围的表面形状所决定的。当电极沿不平表面运动时,通过电容的变化可以看出表面形状所产生影响。

如(5)式:^{[1][4]}

$$\Delta C(x) = K \int_{-\infty}^{+\infty} s(x-\zeta) \Delta h(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

其中, $\Delta C(x)$ 是相对初始间隙 h_0 的变化量 $\Delta h(x)$ 所对应电容变化值,

K 是灵敏度(对应于 h_0), ζ 是积分变量, $s(x)$ 是空间单位冲激响应函数,如果被测表面的测量高度为 $h(x)$,那么

$$h(x) = h_0 + \Delta C(x)/K = h_0 + \Delta h(x) \quad (6)$$

其中

$$\Delta h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x-\zeta) \Delta h(\zeta) d\zeta \quad (7)$$

上式中,被测表面高度的变化量 $\Delta h(x)$,相当于实际表面高度变化值与电容电极单位冲激响应的卷积。所以,电容传感器对表面轮廓的测量等同于一个无源滤波器。

4 实验情况

4.1 灵敏度测试

我们采用两种不同介电常数的陶瓷材料 ($\epsilon_1 = 10\epsilon_0, \epsilon_2 = 1500\epsilon_0$) 封装电极, 电极尺寸均为 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。实验结果表明: 随着测头与被测表面间距离 h 的增大, 灵敏度降低; 随着介电常数的增加测量范围有所增大。在灵敏度为 $1\text{kHz}/\mu\text{m}$ 时, 初始间隙可达 $\approx 100\mu\text{m}$ 左右。见表 1。

4.2 稳定性测试

实验过程中, 我们对测头的稳定性做了大量实验。实验结果表明: 开机预热二小时后, 测头在对空状态下, 稳定性很好, 频率变化值小于 $30\text{Hz}/\text{h}$, 相当于位移变化 $0.03\mu\text{m}/\text{h}$; 测头在测量状态下, 频率变化相对于对空状态时较大, 但其变化不超过 $50\text{Hz}/\text{h}$, 也能满足要求。如图 5。同时, 环境对稳定性的影响也比较大, 尤其温度的变化可引起频率值较大的变化。

5 应 用

这种新型的传感器可以有效地用于工件形状误差的测量, 如圆度、直线度和圆柱度。它还可以用来测量孔的几何尺寸, 尤其在孔内径的测量上具有其它传感器所不具备的优点。此外, 边缘场电容传感器还可以用于表面粗糙度的测量等。

表 1 不同介电常数测头的灵敏度

距 离 h_0 (μm)	灵敏度 ($\text{kHz}/\mu\text{m}$)	
	$\epsilon_1 = 10\epsilon_0$	$\epsilon_2 = 1500\epsilon_0$
50	1.566	3.991
60	1.168	3.226
70	0.987	2.080
80	0.835	1.850
90	0.783	1.566
100	0.665	1.320
110	0.562	1.094
120	0.543	0.964

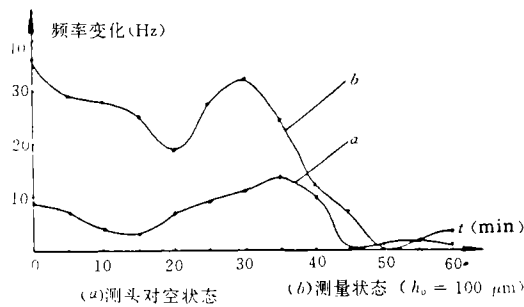


图 3 稳定性测试

参 考 文 献

[1] Garbini J. L., Surface Profilometry Based on Fringing Capacitance Measurement. Transactions of the ASME, 1985, 107

- [2] Gabini J. L. , The Use of Fringe-field Capacitive Sensors for Surface Profilometry and Dimensional Measurement. The Washington Technology Center
- [3] Lai Xiaoyang, Li Jun, The Application of Fringe-field Capacitive Sensors for Dimensional Measurement of Hole and Surface Profilometry. Multinational Instrumentation Conference Proceedings, Beijing, China, Sept. 1992: 258~263
- [5] 毕德显,《电磁场理论》. 电子工业出版社

A New Capacitive Sensor-by the Principle of Fringe-field

Li Xinxin, Li Jun

(National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract

A new capacitive sensor is given in this paper. Unlike the traditional parallel-plate capacitive sensor, it is a measuring instrument with the large measuring scale and high accuracy, based on the principle of fringe-field. It is well-suited for applications in automatic manufacturing and in-process measurements with the properties of fast response, rugged construction and small size. In this paper, we give the detail description of the principle of measuring method, mathematical deduction and experiments. Experimental results show that this fringe-field capacitive sensor has a wide area of applications.

Key words: Fring-field, Capacitive sensor, Ceramic material, Probe