

新型接近式柔性电涡流阵列传感器系统*

陈祥林 丁天怀 黄毅平

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘要:介绍了一种采用柔性印刷电路板工艺制作的新型接近式电涡流传感器阵列及其测试系统,以实现大面积曲面间微小间隙的实时监测。基于时分多路的扫描测试方法,对传感器阵列的设计方法、加工工艺及基底材料进行研究,设计了分叉式结构的线圈阵列及细长扁平引线电缆的柔性传感器探头。对传统的调频式振荡电路进行改进,解决线圈品质因数小的问题,提高了传感器系统的测试性能。试验结果表明,在 2 mm 的量程范围内,传感器系统的测量精度优于 $\pm 0.5\%$,适用于曲面间隙的在线监测。

关键词:电涡流传感器 线圈阵列 柔性基底 接近式测量 时分多路

中图分类号: TP212.1

0 前言

阵列式传感器的研究一直是传感器技术研究中的重要内容。电涡流传感器阵列测试技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期,经过近年的发展,已经在很多领域得到应用,例如用于金属焊缝的检测^[1],飞行器金属部件的疲劳、老化和腐蚀检测^[2],涡轮机、蒸气发生器、热交换器以及压力容器管道的无损检测^[3-6]等。采用阵列式传感器,不需使用机械式探头扫描即可实现大面积范围的高速测量,且能够达到与单个传感器相同的测量精度和分辨率,有效地提高了传感器系统的测试速度、测量精度和可靠性。

近年来,随着传感器技术的发展以及加工工艺水平的提高,柔性传感器阵列的研究越来越受到重视。柔性传感器阵列一般为平面结构形式,它不仅具有普通阵列式传感器的优点,还具有良好的柔韧性,可自由弯曲甚至折叠,而且结构形式灵活多样,可根据测量条件的要求任意布置,能够非常方便地对复杂表面形状的零件进行检测。因此,柔性传感器阵列的研究已成为传感器阵列测试技术研究的重要方向,特别是薄膜柔性传感器阵列,在接近式测量、无损检测以及机器人等领域得到广泛重视和应用^[7-10]。

针对测量两曲面(金属面与非金属面)间微小间隙的应用要求,设计并制作了一种超薄的柔性电涡流传感器阵列。传感器的探头直接用胶粘在非金属表面上,对金属表面进行测量,通过测量传感器阵列中各个阵列单元处的间隙变化,而实现对大面

积规则甚至不规则光滑曲面间微小间隙的实时监测。试验结果表明,在 2 mm 的量程范围内,传感器系统的测量精度优于 $\pm 0.5\%$,分辨率达到 $1\ \mu\text{m}$,而且系统测试速度很快,适用于大面积曲面间隙的在线监测。

1 传感器探头的设计与制作

对于大面积曲面间隙的在线测量,除了满足传感器的量程、灵敏度、测试速度以及测量精度等技术指标要求外,还需要考虑被测面的几何形状和测量空间等条件。要实现对复杂形状形面的检测,传感器的探头应该是一种体形纤薄、基底有一定柔性且对环境影响因素不敏感的柔性探头,然后将其直接置入被测间隙内并贴附在其中的非金属曲面上进行测量。

1.1 制作工艺与基底材料

传统电涡流传感器的探头一般是用漆包线绕制而成的线圈,线圈形状以环形或管状居多。曲面间隙测量所要求的柔性电涡流传感器阵列,是很薄的柔性平面线圈阵列,而且传感器探头整体面积大,因此采用柔性印刷电路板(FPCB)工艺在柔性基底上加工的方法来制作。FPCB 工艺的基本特点是在覆有铜膜的柔性基底上,通过和 PCB 工艺相似的工艺过程,蚀刻出想要的图形,工艺流程如图 1 所示。相对于其他微加工工艺,FPCB 的加工精度不是很高,但是其加工面积能做到很大,适合于传感器阵列大面积制作的要求,而且制作的敏感线圈一致性较好。

对于柔性传感器,基底材料的选择十分重要。根据传感器的使用要求,基底材料应具备较好的耐热、耐腐蚀、耐磨及拉伸能力,较高的绝缘系数和

* 教育部军工配套资助项目。20050718 收到初稿,20060125 收到修改稿

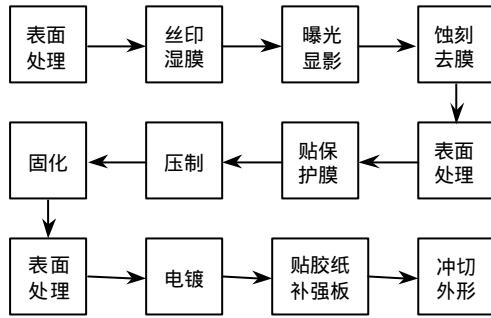


图1 FPCB 工艺流程图

介电常数，此外，加工工艺还要求其具备对金属薄膜材料良好的粘接性能。聚酰亚胺薄膜是目前微电子产品中常用的一种薄膜材料，它具有优异的耐热性能、介电性能、粘附性能、耐辐射性能、力学性能以及很好的化学物理稳定性等。传感器探头的基底材料选用了美国杜邦公司的 Kapton 100FPC-KN 型柔性印刷电路专用聚酰亚胺薄膜，薄膜厚度为 $25\ \mu\text{m}$ ，其抗拉强度超过 $220\ \text{MPa}$ ，最大伸长率达到 75% ，可在 $-269\sim+260$ 的温度范围内长期使用，且具有优良的耐辐射、耐化学腐蚀、耐磨等能力，满足了柔性电涡流传感器阵列的应用要求。

1.2 传感器探头的设计

传感器的探头由一组按照测量条件要求布置的敏感线圈及由各线圈引线形成的一条扁平电缆组成。如图 2 所示，线圈阵列设计为一种条形分叉式结构，这样设计的传感器探头，使用时各分支都能够自由弯曲，不易损坏。而且根据被测表面的形状，线圈阵列还可以设计为不同的结构和形式，从而能够更加方便、可靠地实现对各种不同几何形状形面的测量。为了防止线圈之间的干扰，相邻线圈的间距设计为线圈外径的两倍。线圈阵列中各线圈的引线均从一边引出，形成一条细长的扁平引线电缆，引线电缆可以直接引到被测物体外，通过插头与处理电路连接。

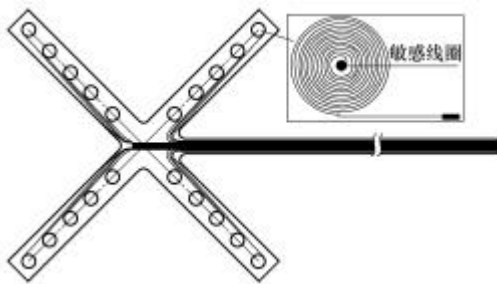


图2 传感器阵列及单个线圈的设计

电涡流传感器的关键部件是敏感线圈，线圈结构参数的优劣直接影响电涡流传感器的各项特性指

标。但是由于加工工艺和使用条件的限制，柔性传感器阵列中线圈参数的变化有限，线圈参数的设计主要是通过对线圈磁场的计算与分析，结合经验公式而得到。针对线圈测量曲面时会产生弯曲变形的问题，传感器阵列的敏感线圈设计为等距螺旋走线的圆形线圈(图 2)，并采用单面结构以减小探头的厚度。

采用 FPCB 工艺加工传感器探头，不仅提高了敏感线圈的一致性，而且线圈阵列能够分布在很大的面积范围内，从而实现大面积范围的测量。最后制作的传感器阵列，其整体平面尺寸达到 $400\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ ，厚度不超过 $0.15\ \text{mm}$ ；单个敏感线圈的外径为 $10\ \text{mm}$ ，实测的线圈电感值约为 $1\ \mu\text{H}$ ，电阻值约为 $2.5\ \Omega$ 。由于传感器探头很薄而且是柔性的，使得它几乎能够应用于任意几何形状形面的测量。

2 传感器系统

2.1 信号变换电路的改进

传感器信号变换电路的特性直接决定传感器系统的工作性能，为了获得较高的测量灵敏度，选用了高稳定性的调频式电容三点式振荡电路。从前面线圈电参数的实测数据可以看出，传感器阵列中各敏感线圈的电感很小而电阻相对较大，因而线圈的品质因数很小。线圈品质因数小，将导致振荡电路输出信号波形变差，甚至停振，故对振荡电路进行了改进。

改进的主要方法是采用电感网络，以牺牲电路的灵敏度为代价，提高其起振性能和稳定性，图 3 是振荡电路的原理图。采用改进后的电路，通过优化选择电感网络的参数，可以在灵敏度和振荡性能之间进行调节，以达到较好的效果。

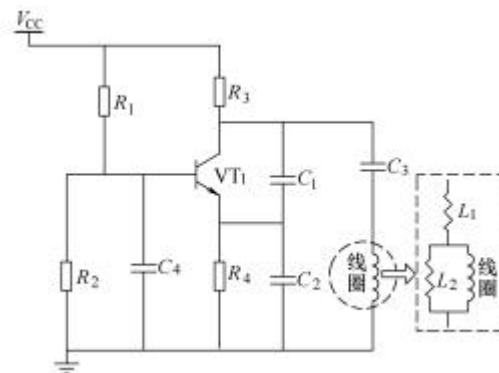


图3 振荡电路原理图

为进一步提高电路的灵敏度，对电路元件的参数进行了调整，在保证电路稳定性等性能的前提下提高振荡电路的中心振荡频率。调整后的振荡电路，

其中心频率高达 3 MHz, 测试的平均灵敏度超过 $70 \text{ Hz}/\mu\text{m}$, 短期稳定性能达到 10^{-6} 量级, 满足了测试系统的要求。

2.2 传感器阵列的测试方法

电涡流传感器响应速度快的特点使其能够很好地应用电子扫描测试的方法, 通过控制模拟开关, 逐个扫描全部的阵列单元, 从而实现传感器探头中所有敏感单元的检测, 测试系统的原理如图 4 所示。考虑到温度对电涡流传感器测量的影响, 还设置了温度传感器对其温度误差进行补偿。采用时分多路的扫描测试方法, 输出信号分时传输, 能够大大简化传感器的后续电路, 有利于传感器系统的小型化, 而且能够在一定程度上削弱各阵列单元之间的干扰。但是由于模拟开关的引入, 也导致传感器的测试精度有所下降。处理电路输出的频率信号的采集由计算机内置的频率数据采集卡来完成, 然后将采集到的数据送入计算机进行处理, 得到所需的间隙值。

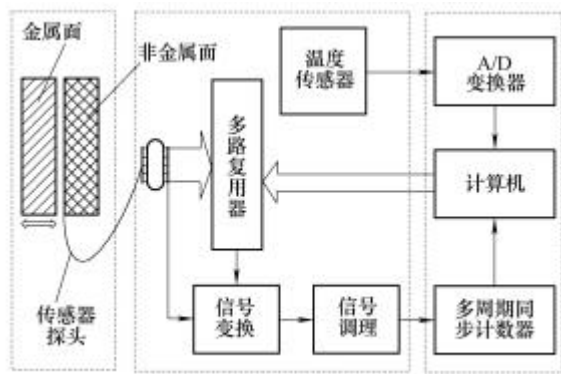


图 4 传感器测试系统原理图

根据电涡流扫描测试的特点, 对线圈阵列的引线进行了优化设计, 并选用多路复用器作为模拟开关器件。线圈阵列中所有线圈引线的一端公共并接地, 作为公共接地端直接与信号变换电路相连, 而另一端分别接入多路复用器, 逐个循环选通接入信号变换电路, 不仅减小了传感器阵列的引线数目, 而且使后续电路得到进一步的简化。

3 系统试验与标定

为检验传感器阵列及测试系统的测试性能, 对传感器系统进行了标定与试验。采用大面积的不锈钢平板对传感器阵列进行标定试验, 试验结果如图 5 所示, 5 条曲线分别是传感器阵列中一条支路上 5 个敏感单元的测试结果。虽然传感器阵列中单个敏感线圈的设计完全相同, 也能达到很好的一致性,

但是由于线圈引线位置和长度的不同, 各敏感单元的电感值略有差别, 这也直接影响了传感器系统中各阵列单元的一致性。因此, 5 条曲线的位置有不同程度的平移, 系统采用计算机软件处理的方法进行补偿。

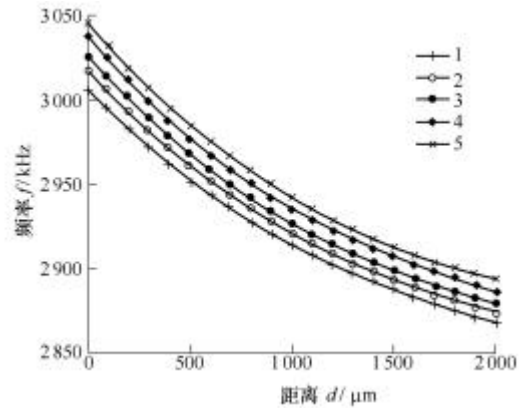


图 5 电涡流阵列的性能试验

进一步对传感器系统的长期稳定性、温度稳定性、湿度稳定性、重复性、零点漂移、线性度和综合测试精度等静态特性进行试验与分析, 测试结果表明, 在 2 mm 的量程范围内, 阵列传感器系统的综合测试精度优于 $\pm 0.5\%$, 全部阵列单元的采样时间不超过 0.5 s, 满足了大面积曲面间微小间隙在线监测的应用要求。

由于文中柔性传感器阵列要求能够用于曲面测量, 因此还针对曲面测量的情况进行了测试。采用曲率半径为 100 mm 的两个同心冠面(材料分别为不锈钢和有机玻璃), 将柔性传感器阵列中的一个敏感线圈紧密粘贴在有机玻璃曲面上进行标定试验, 图 6 是曲面标定和平面标定结果的比较图。试验的数据结果表明, 柔性电涡流传感器贴附在曲面上进行测量时, 传感器的测量结果与平面测量时的差别很小。而且由于敏感线圈的外径相对很小, 对于曲率半径较大的任意形状的平滑曲面, 都可以近似地将其作为平面来处理。

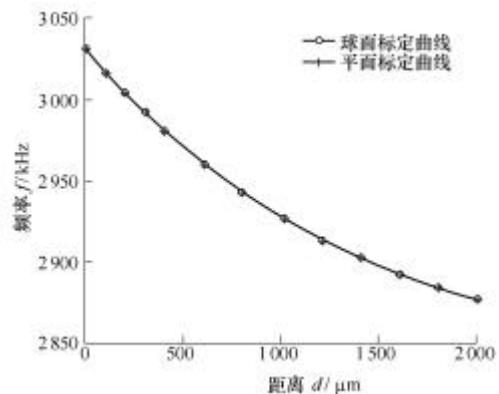


图 6 曲面与平面标定的比较

4 结论

采用柔性印刷电路板工艺，以高性能聚酰亚胺薄膜作为基底材料，制作了一种超薄的柔性电涡流传感器阵列。通过对传感器探头和信号变换电路的设计与改进，采用时分多路的电子扫描测试方法，实现了传感器阵列的快速、高精度测量。试验结果表明，该接近式柔性电涡流阵列传感器系统不仅能够完成大面积曲面间微小间隙的实时监测，也可应用于各种大面积金属曲面的位置状态监测及管、棒等回转体部件内外径的测量。由于传感器阵列的探头非常薄，且具有良好的柔韧性能，使其能够很好的应用于各种规则或不规则光滑曲面的检测。而且，对传感器系统进行适当的改进，还能够用于金属材料的无损检测，具有非常广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] MCNAB A, THOMSON J. Eddy current array instrument for application on ferritic welds [J]. *NDT & E International*, 1995, 28(2) : 103-112.
- [2] GOLDFINE N, ZILBERSTEIN V, WASHABAUGH A, et al. Eddy current sensor networks for aircraft fatigue monitoring [J]. *Materials Evaluation*, 2003, 61(7) : 852-859.
- [3] SIEGEL J D. Array coil probes versus single rotating coil probes for the inspection of steam generator tubes [J]. *Insight : Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 1999, 41(9) : 592-595.
- [4] GOLDFINE N, SCHLICKER D, SHEIRETOV Y et al. Conformable eddy-current sensors and arrays for fleetwide gas turbine component quality assessment [J]. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2002, 124(4) : 904-909.
- [5] HUANG H Y, SAKURAI N, TAKAGI T, et al. Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes [J]. *NDT & E International*, 2003, 36(7) : 515-522.
- [6] CROUCH A, GOYEN T, PORTER P. New method uses conformable array to map external pipeline corrosion [J]. *Oil and Gas Journal*, 2004, 102(41) : 55-59.
- [7] HARDY L, BILLAT A, VILLERMAIN-LECOLIER G. Flat eddy-current matrix sensor for detecting metallic objects [J]. *Sensors and Actuators A*, 1991, 29(1) : 13-19.
- [8] UESAKA M, HAKUTA K, MIYA K, et al. Eddy-current testing by flexible microloop magnetic sensor array [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(4) : 2 287-2 297.
- [9] DING X H, KURIBAYASHI K, HASHIDA T. Development of a new type tactile sensor using micro electromagnetic coil for human robot [C]// *Proceedings of the 2000 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2000 : 181-187.
- [10] DING T H, CHEN X L, HUANG Y P. Ultra-thin flexible eddy current sensor array for gap measurements [J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2004, 9(6) : 667-671.

NOVEL FLEXIBLE EDDY CURRENT ARRAY SENSOR SYSTEM FOR PROXIMITY SENSING

CHEN Xianglin DING Tianhuai HUANG Yiping
(Department of Precision Instruments and
Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract : Novel proximity eddy current sensor array and its testing system are developed to realize the real-time inspection of the small gaps between large curved surfaces. The flexible sensor probe, manufactured by the flexible printed circuit board (FPCB) process, is designed to consist of a forked coils array with a long flat cable by the investigations to the design, process and substrate materials for the eddy current array. The time division multiplexing (TDM) technology is introduced for the eddy current array to scan and sample all the sensor coils. Some reforms are implemented to the conventional oscillator to solve the problem of the coils having a low Q-factor and improve the performance of the sensor system. Experimental results show that the measurement accuracy of the sensor system can reach $\pm 0.5\%$ for a 2 mm full scale and the sensor system is suitable for online gap measurements.

Key words : Eddy current sensor Coils array
Flexible substrate Proximity sensing
Time division multiplexing

作者简介：陈祥林，男，1977年出生，博士研究生。主要研究方向为智能仪器及新型传感器。

E-mail : chenx100@mails.tsinghua.edu.cn