

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108656

交叉电容式传感器研究进展综述*

张洪朋 郑文博 李伟 王英新 赵旭鹏 孙玉清

(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要: 本文介绍了交叉电容原理的起源和发展历程。讲述交叉电容用于电容基准的研究现状以及对1 pF电容量的测量不确定度逐步降低到 10^{-8} 。综述了交叉电容器用于传感器制作的方法和原理以及典型应用,对比传统电容传感器对交叉电容式传感器进行了如下分类:变介质型、变面积型和变极板间距型,并对它的优缺点进行了分析;最后讲述了微小电容检测的方法。在分析现有交叉电容传感器的研究基础上,探讨了如何进一步优化交叉电容式传感器以及发展方向。通过对现有的交叉电容式传感器进行综述归纳,使得电容传感器体系更加完善同时为后续的交叉电容器研究提供参考。

关键词: 交叉电容;电容基准;传感器;电容检测

中图分类号: TP212.1;TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Review of progress in research cross capacitive sensor

Zhang Hongpeng Zheng Wenbo Li Wei Wang Yingxin Zhao Xupeng Sun Yuqing

(School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper introduces the origins and derivation of cross capacitance principle. Its development for capacitor benchmarks and the gradual reduction in biasness while measuring 1 pF capacitance to 10^{-8} was discussed. Furthermore, the methods, principle and application of cross capacitor in sensor manufacturing and in micro capacitance detection methods was reviewed. Compared with the traditional capacitance sensor, the cross-capacitance sensor is classified as follows: Variable medium type, variable area type and variable plate spacing type, and its advantages and disadvantages are analyzed. Based on the analysis of the existing cross-capacitance sensor research, how to further optimize the cross-capacitance sensor and its development direction are discussed. By summarizing and summarizing the existing cross-capacitive sensors, the capacitive sensor system is more perfect and a reference is provided for the follow-up cross-capacitor research.

Keywords: cross capacitance; capacitor benchmarks; sensor; capacitance detection

0 引言

传感器是中国“强基工程”的核心部件之一,已经渗入到工业的各个环节,涉及国民经济的各个行业领域^[1]。传感器作为物联网系统的最初部分,是决定系统特性和性能指标的关键部件^[2]。根据其物理型检测原理可以将传感器分为压电式、磁电式、光电式以及电参量式传感器,而电参量式传感器又分为电阻式、电感式和电容式3种。电容式传感器具有结构简单、检测灵敏度高、可实现非接触式检测等突出优点被广泛应用于多种物理量包括压力、位移、液位以及各种物质含量等值的测量。

交叉电容实际上是一种高精度的电容基准。交叉电容装置也是目前国际电磁计量领域内除量子电压和量子电

阻之外具有最高准确度水平的装置^[3]。自交叉电容理论发现以来,在很多国内外研究所^[4-7]采用可计算的交叉电容来实现和维持电容基准。中国计量科学研究院^[8]通过电容电桥实现采用交叉电容复现1 pF电容单位的相对标准不确定度可以达到 1.0×10^{-8} ,目前处于国际领先水平。电容、电阻、电感是电子和电力的基础,阻抗基准的不断完善和提高必将促进电子产品行业、电力行业、仪器仪表行业的发展^[9-10]。

交叉电容理论以其高精度、高稳定性在国际电磁计量领域中作为复现基准技术已经相当成熟,近些年国内外学者在交叉电容式新型传感器研制方面开展了深入的研究。交叉电容的高精度度和其独有的特点使得交叉电容式传感

收稿日期:2021-12-22

* 基金项目:国家自然科学基金(51679022)、大连市科技创新基金(2019J12GX023)项目资助

器相较于普通电容式传感器具有更高的线性度和检测灵敏度。

本文综述了 3 种类型的交叉电容式传感器,对传感器的结构、实验原理和优势等进行总结和分析,阐述了交叉电容式传感器的改进方向以及在未来该领域研究的发展趋势。虽然交叉电容式传感器有着独特的优势,但国内的相关研究并不多,本文对所出现的研究做了相关综述,为后续的研究者提供了一定的研究理论基础,将来交叉电容式传感器方向的研究一定会蓬勃发展。

1 交叉电容理论分析

1.1 交叉电容及其原理简介

计算交叉电容(calculable cross-capacitor)又称为计算电容或者交叉电容,其理论是由澳大利亚计量院(NMIA)的 Thompson 等^[11]所提出并证实的新的静电学理论。交叉电容是在研究圆柱形电容器时发现的一种新的电容器,其结构如图 1 所示,由 4 个相同圆柱电极两两对称放置,相邻两电极之间有无穷小绝缘间隙,放置于一个屏蔽罩内,对其中一个施加一个单位的电动势,其余 3 个电极进行接地。

此时电极 1、4 和电极 2、3 之间的电容值称为交叉电容值,每一对交叉电容的值($C_{14}=C_{23}$)都相等,单位长度的电容值为 $C = \frac{\ln 2}{4\pi^2} \text{e. s. u.}$,其电容量只与其轴向长度有关而与圆柱电极的形状、截面方向尺寸均无关,而轴向长度可以用光波干涉仪准确地测定^[12]。实验证明,由其长度计算得到的电容与实际测量的值误差小于万分之一。普通的平行板电容器、同轴圆柱电容器等均可作为电容器基准的电容器,但是计算出这些电容器的电容量需要准确测出多组几何尺寸并计算出修正量,不易实现。

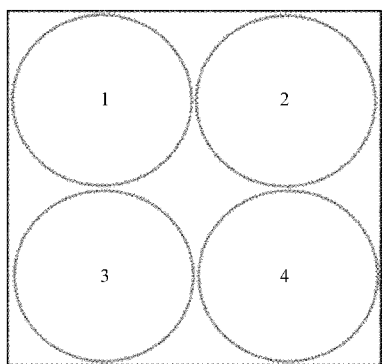


图 1 交叉电容结构

上式中 e. s. u. 是 19 世纪 70 年代~20 世纪 50 年代使用的 CGS 制(即以 cm、kg、s 为基本单位)的电容值单位,1954 年第十届国际计量大会(CGPM)之后就逐渐不再使用这种单位^[13-14]。将上面这个单位转换为电容的国际单位(SD 法拉,则需要乘一个系数 $4\pi\epsilon_0$)。1982 年印度理工学院的 Rehman 等^[15]在 Lampard 等^[16-17]理论推导的基础上进

一步简化,得到单位长度的交叉电容值为 $C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi}$ 。

单位长度的交叉电容的电容量虽不受圆柱电极形状影响但仍要满足图 2 中的要求。图 2 是圆柱电极的横截面,AB 和 CD 两条线相互垂直,要求 AB 是一条对称轴,AB、CD 所在的两个垂直的平面将该截面分成 4 个部分,要求这两个平面的相交线平行于圆柱电极的母线。交叉电容主体结构是由这样 4 个相同的圆柱体交叉对称放置组成。

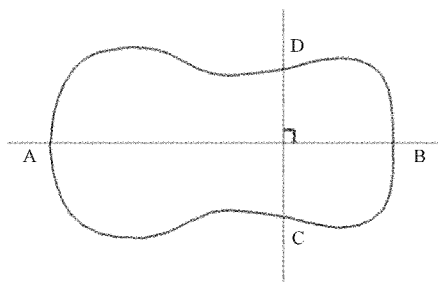


图 2 圆柱电极的横截面

1.2 交叉电容的发展现状

交叉电容作为电容基准,同时国际单位制的长度单位和电容的直接关系可以通过交叉电容器以 5×10^{-8} 的准确度实现^[18]。而确定长度基准和电容基准的另一种方法可以用基于交流量子霍尔效应确定两者关系,但它的精度受限于冯·克里青常数的不确定性^[19]。自从汤普森和兰帕德发现交叉电容原理以来,大量相关领域的科研工作者对其不断创新研究,旨在提高静电电容标准的基准精度。静电电容标准目前是绝对电气标准中最高精度标准^[20]。

1) 国外交叉电容研究现状

澳大利亚国家测量研究所(NMIA)和国际测量局(BIPM)一直在参与新型可计算交叉电容器的设计和制造^[21]。加拿大研究委员会和中国计量科学研究院也在制造主电极组,其设计标准也都是按照以下标准制造。该设计要求不锈钢实心电极的直径为 50 mm,长度为 470 mm,除了每个电极的末端固定位置的 50 mm 外,其余部分要求几何精度达到 100 nm。Small 用 316 不锈钢磨制加工出符合上述标准的主电极,在经过几次尝试之后找到了最佳制造方法并详细说明了其工艺流程。若想制造出满足预期精度的电极棒必须有一个精确测量几何形状和尺寸的装置,为此,澳大利亚国家测量研究所设计并建造了一个自动化测量系统圆柱度测量仪。该装置采用 4 个电容探针测量圆柱圆周表面到圆柱轴线之间的距离以此来反映其表面粗糙度,电容探针的测量值通过电容电桥测量采集,改进后的圆柱电极的表面粗糙度测量结果如图 3 所示,横坐标表示电容探针在圆周一圈的路径位移,纵坐标表示的是从圆柱面上的点到圆柱轴线之间的距离^[22]。图 3 中显示的测试结果表明该圆柱电极的表面粗糙度很小,满足 100 nm 几何精度要求。

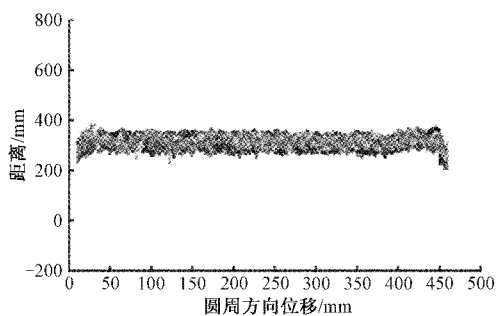


图3 圆柱表面高度

NMIA 建成了一组 17 个参考电容标准用于电容的测量链:9 个充氮殷钢合金电容,范围从 5 pF 到 50 pF;8 个熔融石英电容,范围从 50 pF 到 500 pF^[23]。由于熔融石英材料镀金属制成的交叉电容器会因为温度的影响造成 10^{-5} F/K 的误差,NMIA 设计了一种稳定温度的温度控制外壳,这种设计可以在短时间内保持电容整体温度在预设温度的稳定性达到 1×10^{-4} K^[24]。

2) 国内交叉电容研究现状

中国的交叉电容器于 1978 年建成,其不确定度达为 3.5×10^{-7} 。2013 年底,中国计量科学研究院(NIM)与澳大利亚国家计量院(NMIA)合作,初步建立了新型立式交叉电容器,并配备了可移动保护电极。在立式交叉电容结构中,固定和可动屏蔽电极的存在会使得电极两端的电场发生变化,由移动电极端部和主电极不平行等联合造成的误差影响,称为端部效应误差^[25]。目前按主要有两种方法对其进行补偿消除,第 1 种是国外例如澳大利亚、加拿大、美国以及法国等国家计量院所使用的改良型钉子头的机械方法进行补偿^[26]。第 2 种方法是由中国计量科学研究院于 1982 年提出的电极补偿方法^[27]。从 2012 年开始,电补偿方法的研究先后经历实心电补偿电极^[28]、中空电补偿电极^[29]及改良型中空电补偿电极^[30]之后,最终研制成了最优中空电补偿电极^[31]。结果表明,改进的有源辅助电极对末端效应误差的补偿效果优于改良型钉子头,其电极补偿方法可以使反映可动屏蔽电极偏心影响量的重要指标 K 值最小比机械方法小一个数量级。通过两端对电容电桥完成的计算电容复现 1 pF 电容单位的相对标准不确定度为 1.0×10^{-8} ^[32]。

2 交叉电容式传感器

真空环境下单位长度的电容值为 $C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi}$,介电常数 ϵ_0 与光速 c 和真空磁导率 μ_0 的关系式为 $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$,从而可以通过交叉电容的值来计算出光速^[33]。1938 年,国际电工委员会(IEC)将其定义为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A²。用此方法测定的光速值不确定性可以达到 1×10^{-6} ^[34]。国家标准实验室也利用真空的圆柱形交叉电容器作为阻抗标准来实

现对电阻单位欧姆(Ω)的精确计量^[35]。

Rehman 等^[36]在交叉电容的基础上提出交叉电导的概念用于测量材料的电导率,具有高度的准确性和精度。传感器的电导仅为厚度的函数,基于交叉电导的传感器在测量液体的电导率^[37]、湿度测量^[38]中有很好的应用。而后,Zargar 等^[39]首次将交叉电容与氧化铝薄膜结合用于湿度测量,传感器内随着湿度的增加,更多的水分子被吸附到纳米结构多孔氧化铝膜的表面。该膜是高度亲水并且具有很高的有效表面积,水分子的吸附会导致其介电常数增加,从而引起电容值的变化。

传统的电容式传感器在实际应用时,常通过改变介电常数^[40]、电极板间距^[41]和极板相对覆盖面积^[42]其中一个参数来使电容值 C 发生变化,即 $C = f(d, s, \epsilon_r)$ 。通过测量电容值 C 的变化进行定量判断被测参量的大小。同样的,交叉电容式传感器通常也根据电极间的介电常数、极板位移和电极覆盖面积的变化引起电容值发生变化来实现检测。

1) 变介电常数型

介电常数是用填充电介质的电极系统与同一系统在真空或空气中的电容之比来测量的,介电常数反映电介质在电场中储存静电能的能力大小^[43-44]。变介电常数型传感器原理主要是根据被检测物质进入交叉电容器内时引起介电常数变化从而电容发生变化。目前采用这种原理的交叉电容传感器主要用于检测气体、液体的介电常数以及检测液滴和金属颗粒等。

美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology)首次使用交叉电容器来测量气体介电常数。在压力为 3 MPa、温度为 7 °C 和 50 °C 的条件下测量了氮气和氟气的介电常数值。传感器装置结构如图 4 所示^[45],其中 r 为 50 mm, w 为 10 mm, h 为 9.5 mm, s 为 0.15 mm。

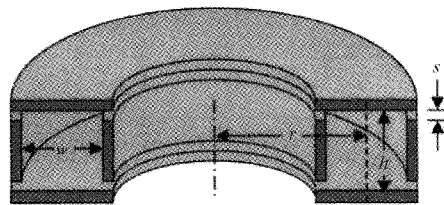


图4 横截面接近正方形的环形交叉电容器

由于该交叉电容器长度较小其电容值也相应较小,因此,交叉电容需要使用高精度的电容电桥(AH-2500A)对其进行测量。其次,需要测量两次电容才可得到 C_x 的值,因为该交叉电容没有完全对称,故定义 C_x 为 $C_x \equiv \omega C_h + (1 - \omega)C_w$,这里 ω 为一个修正系数,此处取 $\omega = 0.45$,以使得该交叉电容值与完全对称交叉电容值更加接近。最终测量的值与这两种气体在其他资料中的预期值^[46]是一致的。

韩国标准科学研究所^[47]利用交叉电容器的原理,研制了一种测量液体介电常数的精密系统。交叉电容器的 4 个电极是通过电镀一层金膜在熔融石英管周围组成。结构如图 5 所示。该传感器管作为被测液体的容器和两对交叉电极的支撑。这种结构优点是制造方法和流程简单,可以控制石英管的厚度来达到传感器的设计要求;缺点是不能完全确保各个电极之间的对称性。常温常压下,被测液体的介电常数为:

$$\epsilon_l = \frac{(C_{i_{1-2}} + C_{i_{3-4}})}{(C_{a_{1-2}} + C_{a_{3-4}})} \times \frac{(1 + k_a)}{(1 + k_l)} \times 1.0006 \quad (1)$$

式中: ϵ_l 为待测液体介电常数, $C_{i_{1-2}}$ 、 $C_{i_{3-4}}$ 和 $C_{a_{1-2}}$ 、 $C_{a_{3-4}}$ 分别是用交叉电容传感器充满液体和充满空气的两组值, k_a 和 k_l 是空气和液体的修正系数,其大小跟管壁厚度与石英管直径的比值有关。在 300 K 的温度和 1 kHz 的条件下,用不同的传感器管对相同的非极性液体(不同的油液和树脂液体)的测试结果是相同的,说明该传感器的可重复性高。在考虑管壁介电特性的影响后,用 0.02% 到 0.05% 的不确定性标准来确定待测液体的介电常数是可以实现的。

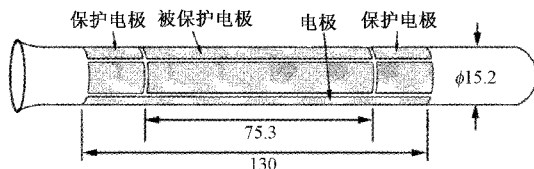


图 5 石英管镀金膜传感器^[47]

当液滴在电极之间存在会导致介电常数的变化,不同液滴的体积和介电常数引起电极之间不同的电容值相应变化。Zargar 等^[48-49]提出一种非接触式检测微液滴传感器,结合交叉电容结构解决了普通电容结构的电极距离、电极面积、弯曲、倾斜等几何特性对传感器的影响。传感器的输出信号用 AD7150 电容数字转换器传输到电脑端。并对不同体积大小、不同种类和不同浓度的液滴进行分别检测,图 6 为传感器结构图,图 7 是不同体积的水滴的电容响应,可见传感器检测线性度很好。Islam 等^[50]基于交叉电容原理提出一种检测油液中金属颗粒的传感器装置,该装置可以实现对 10.5 mg 的铜颗粒的有效检测。金属颗粒从传感器中穿过时会引起电极间的介电常数发生变化,根据检测电容值的变化,判断是否有金属颗粒污染物。实验验证了传感器检测金属颗粒的线性度、可靠性和可重复性很高。

采用交叉电容设计的介电常数传感器有几个重要优势:(1)稳定性好,测得的数值误差在可允许的范围内;(2)可重复性高,隔一段时间或者换不同的传感器都可以检测到相同的结果;(3)影响因素少,如图 5 中的石英管壁的厚度对传感器的影响会很小。

2) 变面积型

变面积型的交叉电容式传感器的检测原理通常是依据

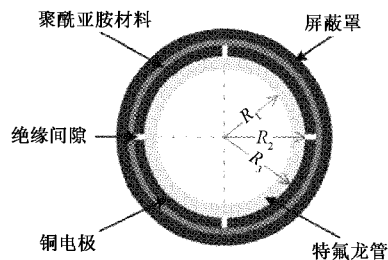


图 6 微液滴检测传感器结构图^[48]

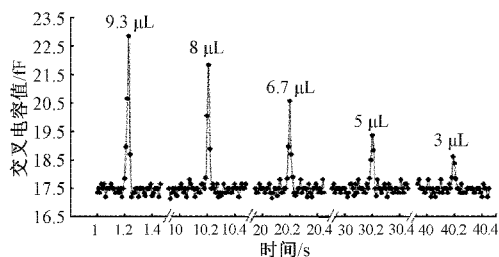


图 7 不同体积水滴的电容响应^[48]

圆柱形交叉电容器内液体的液位高度不同,会有不同面积的交叉电容器的电容值发生改变。目前用这种原理的传感器主要用于测量液体的液位高度、压力检测等。

Rehman 等^[51]利用圆柱形交叉电容器设计了新型电容式压力传感器,该传感器可用于中低压的高精度测量,分辨率可以达到 0.14 Pa。由于交叉电容器中心空间的汞柱的高度受输入压力的变化而变化,其检测原理通过测量汞柱的液位高度而得到所测压力的值。另外可以比较两组交叉电容内部的液面高度差从而得到所测的两部分压力差。其中电容的测量是通过在一个变压器电桥装置中使用高精度的感应分压器和标准参考电容,它具有较高的灵敏度、较大的功率容量、收敛性好,并且各部件有共地端易于屏蔽等优点。用多个交叉电容传感器进行测量,测得每两个交叉电容的值相差不到 0.1%,可见其可靠性很高并且具有很高的线性度。

于航等^[52-53]在传统电容式液位传感器的基础上,根据计算交叉电容原理设计了一种交叉电容式液位传感器,将双层套筒结构改为单管式结构,结构如图 8 所示。在石英管外壁镀上金属镀层,将金属镀层中间隔划分成高电极、低电极以及保护电极。保护电极的作用是减小边缘效应,可以提高灵敏度。

当管内有液体时,测得的电容值 C_x 是空气部分的电容 C_1 和被液体浸没的电容 C_2 之和,最终的表达式为:

$$C_x = \frac{C_x - C_1}{C_2 - C_1} \cdot l \quad (2)$$

式中: l_x 即为被测液体液位高度, l 是电容传感器的有效长度。用无水乙醇进行试验,采用 PCAP01 信号转换模块和同惠 TH2617 型电容测量仪对结果进行测量,最终得到的实验数据显示被测液体液位与传感器电容量有很好的线性

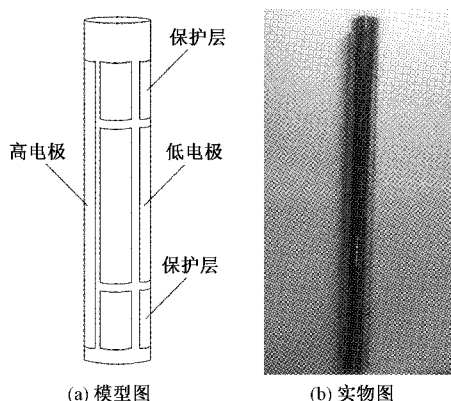


图8 交叉电容式液位传感器

相关性,线性度可以达到0.48%,Yu等^[54]在经过系统补偿后实验所测实验数据线性度达到0.47%,数据显示液位在0~200 mm范围内进行变化时回程重复性误差为0.59%,并丰富了理论推导。

王颖等^[55-56]在于航的基础上进行优化改良,用有限元软件ANSYS Maxwell关于液位传感器的结构对液位测量带来的影响进行仿真。仿真结果表明有屏蔽层、石英管径越大、石英管厚度越薄,传感器单位长度的电容信号越大且极板间隙最佳张角为2.6°。而后实验验证仿真结果,二者趋势基本一致。

3) 变电极间距型

由于交叉电容特殊的结构特点,交叉电容的各个电极不能发生较大的位移变化,因此变间距型交叉电容传感器应用较少。研究发现,电极在径向方向上发生 $\pm 10 \mu\text{m}$ 之内的位移所起的交叉电容器的电容值变化为 $4.1 \times 10^{-8} \text{ pF}/\mu\text{m}$ ^[57]。

黄山^[58]设计了由交叉电容器和PXI-6733信号发生器和PXI-5922数据采集卡组成的交叉电容式测微距传感器系统,用以解决电极的精确安装问题。通过两圆柱电极之间的距离与电容值成反比的规律,比较各电极之间的电容值的差值,从而确定电极微调方向,以此可以对电极的精确安装定位从而提高交叉电容的精度。

以上所述交叉电容式传感器多采用4个1/4圆柱电极组成,而实际上满足交叉电容原理的结构均能够满足使用要求。因此可以根据不同的使用条件在满足Thompson-Lampard定律下设计不同的交叉电容结构,如图9所示。

3 电容检测方法

由于传感器的待测电容值非常小,因此对测量电路和设备要求很高,而且对电容的测量通常需要将电容信号转换为电压、频率等信号,以方便信号的采集和读取。常用于电容传感器的电容测量方法主要有如下5种:谐振法、振荡法、交流电桥法、运算放大器法和开关充放电法。

1) 谐振法的原理是将可调频电源加到被测电容C两端,然后和固定电感并联组成谐振电路,谐振频率是由电容

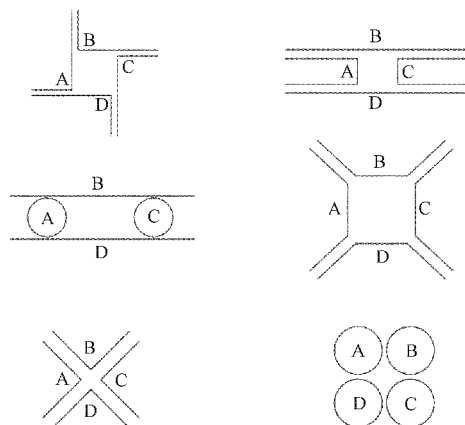


图9 可能出现的交叉电容器的横截面

和电感的大小决定^[59]。测量谐振的频率就可以得到被测电容的值。谐振法信号转换的缺点是对频率的测量电路要求很高,电感值较大时容易造成电路不稳定^[60]。中国电子技术标准化研究院的高级工程师赵飞等^[61]通过实验分析研究了基于分离圆柱体谐振腔法的材料复介电常数测量系统,针对测试频率不够高等缺点,给定最优的频率测试方法和标定方法,谐振腔法测量系统对于微波介质材料的复介电常数测量结果稳定性有了很大的提高,谐振腔法测量系统非常适合作为计量标准装置,可用于介质材料标准样片的复介电常数的校准。

2) 振荡法的原理是将被测电容C的测量转换为测量振荡频率,其中振荡频率由RC或LC共同决定,通过对振荡频率的测量间接实现电容转换,而频率可以使用计数器或者F/V转换器的方法测得^[62]。RC振荡法简单,但稳定性差;LC振荡法检测范围广,具有较高灵敏度,但两者共同缺点是抗寄生电容干扰的能力差。电子科技大学李兵兵等^[63]设计了一种新型的张弛振荡电容感测装置,利用一个由标准比较器和固定电阻并通过给被测电容不停周期性充放电构成一个张弛振荡器,利用计数器测量其周期和频率就可实时检测电容的值,该设计从一定程度上降低了电容触摸感测的设备成本。

3) 交流电桥法是将被测电容和一个可调的参考阻抗分别连接到电桥的两个桥臂上同时保证两个桥臂连接的是频率和电压相同的信号源,通过调节参考阻抗使电桥达到平衡,则此时的被测电容和参考阻抗满足共轭相等,如图10所示电桥平衡应满足 $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ 。该方法优点是检测精度高,可以用于高精度测量;但同时交流电桥法的电路设计复杂,人为调节电桥平衡操作难度较大。广西师范大学陆彦丹等^[64]通过对比几种不同结构的交流电桥以及不同频段频率对电容检测效果的影响,得出如下结论低频^[65](30~300 kHz)时西林电桥检测效果最佳,中频(300~3 000 kHz)时串联电阻式电桥效果最佳,而高频(3 MHz以上)时各种交流电桥由于误差太大都不适用。

4) 运算放大器法的原理是当驱动电压幅值固定时,输

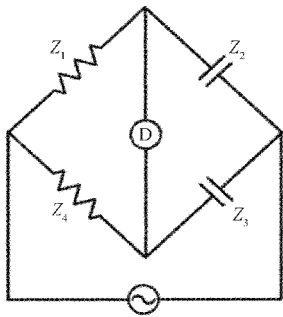


图 10 电容电桥

出电压随被测电容 C 的增大而升高,由此通过测量输出电压值便可以得到被测电容值。这种方法可实现高可靠性的高精度检测,可准确测出 fF 量级的微电容,检测精度可达到 9.79 mV/fF 的直流电压输出^[66-67]。这种电容信号转换方法的主要问题在于对标准参考电容的稳定性和精度有很高的要求,同时电容转换精度也受运算放大器本身温度漂移的影响^[68]。东南大学的易艺等^[69]用电容数字转换芯片和运算放大器设计了脉冲激励式和电容转换芯片 AD7746 检测电路,实现微弱电容准确度高精度检测。

5) 开关充放电法是通过控制开关对被测电容充放电,得到与被测电容成比例关系的直流电压输出。开关充放电法转换电路的优点为:几乎不受温度漂移和被测电容漏电阻的影响,自动转换,精度高。这种方法若能消除寄生电容的干扰,电容转换精度将进一步提高。开关充放电法以其独特优势在工程研究的各类电容传感器的设计中应用较多。北京航空航天大学的朱彦波等^[70]根据开关磁阻电机的特性建立了储能飞轮的数学模型,设计了系统充放电控制方式,具有响应速度快、稳态精度高的特点。华南理工大学的曾君等^[71]结合可控开关电容(SCC)技术和电容电荷充放电平衡技术提出一种多路 LED 驱动电路,具有良好的调控性能和拓展。

4 结 论

本文综述了交叉电容作为电容基准与交叉电容器应用于传感器的研究现状。重点介绍了交叉电容应用于传感器的几种结构、检测方式、应用领域等方面的最新成果;总结了现有的微小电容量的检测方法和原理。根据对现有研究的思考,提出了以下需要进一步深化研究的方向。

1) 使交叉电容结构微型化,更有利于设备集成化;同时检测设备更加小巧实现便携化,方便多种工况下的使用。

2) 对交叉电容式传感器检测结果的不确定度的原因进行深化研究,深入了解不同因素对传感器检测效果的影响,进而可以提高检测精度。

3) 对于交叉电容器的结构优化,电极形状可多元化,例如可以根据需求采用弧形电极或者其他形状电极。可以进行多电极的电容器仿真模拟,进行实验论证,研究 $2n$ 片电极组成的电容器与交叉电容器之间的联系,并进行理论

分析。

4) 根据交叉电容原理,其结构也可以根据实际应用要求采用不同形式的结构,可对交叉电容器进行结构创新研究。

参考文献

- [1] 曾天禹,徐航,黄显. 呼出气传感器进展、挑战和未来[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8):65-81.
- [2] 张洪朋,顾长智,张兴明,等. 基于 MEMS 的液压系统 V 锥传感器的仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(5):419-424.
- [3] 我国建成新一代计算电容装置[J]. 计量与测试技术,2014,41:3-5.
- [4] DELAHAYE F, FAU A, DOMINGUEZ D, et al. Absolute determination of the Farad and the Ohm, and measurement of the quantized Hall resistance $R_H(2)$ at LCIE[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987 (2): 205-207.
- [5] BACHMAIR H, FUNCK T, HANKE R, et al. Realization and maintenance of the unit of capacitance with the PTB cross capacitor during the last ten years[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2): 440-442.
- [6] JEFFERY A M, ELMQUIST R E, LEE L H, et al. NIST comparison of the quantized Hall resistance and the realization of the SI ohm through the calculable capacitor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(2): 264-268.
- [7] SMALL G W, RICKETTS B W, COOGAN P C, et al. A new determination of the quantized Hall resistance in terms of the NML calculable cross capacitor[J]. Metrologia, 1997, 34(3): 241.
- [8] 黄璐,杨雁,陆祖良,等. 采用电补偿方案的新一代立式计算电容装置[J]. 计量学报,2020,41(3):279-283.
- [9] 陆祖良,黄璐,杨雁,等. 可移动屏蔽型计算电容研究[J]. 电测与仪表,2013,50(11):23-28.
- [10] 我国计算电容基准经国家鉴定正式建立[J]. 计量技术,1978(5):46.
- [11] THOMPSON A M, LAMPARD D G. A new theorem in electrostatics and its applications to calculable standards of capacitance[J]. Nature, 1956, 177: 888.
- [12] 王建波,钱进,刘忠有,等. 计算电容中 Fabry-Perot 干涉仪测量位移的相位修正方法[J]. 物理学报,2016(11):40-48.
- [13] 沈平子. 电磁计量单位及其基准的发展[J]. 中国计量,2004(3):45-48.
- [14] 沈平子. 电磁计量单位及其基准的发展(续)[J]. 中国计量,2004(4):45-46.
- [15] REHMAN M, MUKERJI S K, MURTI V. Effect of

- a symmetrically placed dielectric tube on the capacitance of a cylindrical cross-capacitor [J]. IEE Proceedings Physical Science, Measurement and Instrumentation, 1982(6):338-345.
- [16] LAMPARD D G. A new theorem in electrostatics with applications to calculable standards of capacitance[J]. Proceedings of the IEE-Part C: Monographs, 1957, 104(6): 271-280.
- [17] LAMPARD D G, CUTKOSKY R D. Some results on the cross-capacitances per unit length of cylindrical three-terminal capacitors with thin dielectric films on their electrodes[J]. Proceedings of the IEE-Part C: Monographs, 1960, 107(11): 112-119.
- [18] LEE R D, KIM H J, SEMENOV Y P. Quasi-monolithic toroidal cross-capacitor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(2):538-541.
- [19] TRAPON G, THEVENOT O, LACUECILLE J C, et al. Determination of the von Klitzing constant R_K in terms of the BNM calculable capacitor-fifteen years of investigations[J]. Metrologia, 2003, 40(4):159.
- [20] IGARASHI T, KANNO M, KOIZUMI Y, et al. Improved horizontal cross capacitor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1970, 19(4): 297-302.
- [21] SMALL G W, FIANDER J R. Design of a calculable cross-capacitor [C]. 2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 2004: 485-486.
- [22] SMALL G W. Fabrication of the main electrodes of the NMIA-BIPM calculable capacitor [C]. CPEM IEEE, 2010.
- [23] SMALL G W, COOGAN P C, CAMERON G C. A suite of capacitors of fixed values for use with the new calculable cross capacitor and measurement system at the National Measurement Institute Australia [J]. Metrologia, 2017, 54(6): 837.
- [24] JOHNSON H L, COOGAN P C, SMALL G W, et al. Purpose-built air bath for use with NMIA calculable cross-capacitor measurement chain [C]. CPEM 2018, 2018.
- [25] HUANG L, SMALL G W, LU Z, et al. Model tests of electrical compensation method for the new calculable cross-capacitor at NIM [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 62(6):1789-1794.
- [26] JEFFERY A M, LEE L H, SHIELDS J Q. Model tests to investigate the effects of geometrical imperfections on the NIST calculable capacitor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(2): 356-359.
- [27] ZHONG-HUA Z, ZU-LIANG L. A new method for reducing the end-effect error of the cross-capacitor with a movable guard rod [J]. Acta Metrologica Sinica, 1982, 3(4): 250-258.
- [28] HUANG L, SMALL G W, LU Z L, et al. Model tests of electrical compensation method for the new calculable cross-capacitor at NIM [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2013, 62(6): 1789-1794.
- [29] HUANG L, LU Z L, YANG Y, et al. A novel hollow active auxiliary electrode applied for the vertical calculable cross-capacitor at NIM [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2015, 64(6): 1657-1662.
- [30] HUANG L, LU Z L, YANG Y, et al. The optimal hollow active auxiliary electrode and its additional functions research [C]. Proc CPEM Dig. Ottawa, Canada, 2016.
- [31] HAUNG L, YANG Y, LU Z L, et al. Practical application of latest optimal hollow active auxiliary electrode in vertical calculable cross-capacitor at NIM [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2019, 68(6): 2144-2150.
- [32] 黄璐, 杨雁, 陆祖良, 等. 采用电补偿方案的新一代立式计算电容装置 [J]. 计量学报, 2020, 41(3): 279-283.
- [33] ANTONIO C M. QUEIROZ. Capacitance Calculations[EB/OL]. [2003-5-11] <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/capcalc.pdf>
- [34] CLOTHIER W K. A calculable standard of capacitance[J]. Metrologia, 1965, 1(2):36.
- [35] SHIELDS J Q, DZIUBA R F. New realization of the ohm and farad using the NBS calculable capacitor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(2):249-251.
- [36] REHMAN M, MURTI V G K. An extension and application of the Thompson-Lampard theorem [J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(11): 1512-1514.
- [37] REHMAN M, MURTI V G K, GUPTA M R. A novel precision type liquid conductivity measuring system [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1985, 18(11):902.
- [38] ISLAM T, ZARGAR Z H, REHMAN M. A novel humidity sensor based on the extension of thompson and lampard theorem [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(12):4237-4241.
- [39] ZARGAR Z H, ISLAM T. A Thin film porous alumina-based cross-capacitive humidity sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020.

- [40] ZHANG H, CHON C H, PAN X, et al. Methods for counting particles in microfluidic applications [J]. *Microfluidics and nanofluidics*, 2009, 7(6): 739-749.
- [41] 李宁. 基于 PEDOT:PSS-CNT 和平板电容的柔性温度压力传感器研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [42] 张珂, 杨其华, 陈洪飞. 一种新型变面积电容式角度传感器的设计[J]. *电子器件*, 2007(6): 2108-2111.
- [43] 许丽萍, 薛锐, 高燕琴, 等. 工程电磁场[M]. 人民邮电出版社, 2014.
- [44] 张晓飞. 基于介电常数测量的油液监测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- [45] BUCKLEY T J, HAMELIN J, MOLDOVE M R. Toroidal cross capacitor for measuring the dielectric constant of gases [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(7): 2914-2921.
- [46] GOODWIN A R H, MEHL J B. Measurement of the dipole moments of seven partially fluorinated hydrocarbons with a radiofrequency reentrant cavity resonator[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1997, 18(3): 795-806.
- [47] LEE R D, KIM H J, SEMENOV Y P. Precise measurement of the dielectric constants of liquids using the principle of cross capacitance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2001, 50(2): 298-301.
- [48] ZARGAR Z H, ISLAM T. A novel cross-capacitive sensor for noncontact microdroplet detection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(6): 4759-4766.
- [49] ZARGAR Z H, ISLAM T, AKRAM K J. Design and development of a non-contact cross-capacitive micro droplet detector [C]. 2018 IEEE SENSORS. IEEE, 2018: 1-4.
- [50] ISLAM T, YOUSUF M, NAUMAN M. A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris detection in insulating oil [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 025005.
- [51] REHMAN M, MURTI V G K. A sensitive and linear pressure transducer[J]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 1981, 14(8): 988.
- [52] 于航, 禹静, 李东升, 等. 单管计算电容式燃料液位传感器理论特性研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(5): 681-685.
- [53] 于航. 计算电容式燃料液位传感器的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
- [54] YU J, YU H, LI D. Design and characteristic analysis of cross-capacitance fuel-level sensor [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3981.
- [55] 王颖, 禹静, 李东升, 等. 单管计算电容式液位传感器的仿真与特性研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(6): 893-898.
- [56] 王颖. 计算电容式液位传感器结构仿真优化与信号转换技术[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- [57] LEE R D, KIM H J, SEMENOV Y P. Quasi-monolithic toroidal cross-capacitor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2005, 54(2): 538-541.
- [58] 黄山. 用于计算电容主电极精确定位安装的电容式微距传感器设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [59] 高超. 新型栅状电容式液位传感器的设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [60] 罗健. LC 无线无源眼压传感器信号采集电路设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [61] 赵飞, 裴静, 徐沛, 等. 谐振腔法复介电常数测量系统的谐振频率标定[J]. *宇航计测技术*, 2019, 39(1): 19-22.
- [62] 赵雪英, 郭雨梅. 一种小电容检测方法—充放电法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2003(1): 55-57.
- [63] 李兵兵, 周焯, 黄子强. 基于张弛振荡原理的触摸感测电容设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 808-811.
- [64] 陆彦丹, 朱长明, 王丽光, 等. 不同交流电桥中电容测试性能的比较[J]. *广西物理*, 2019, 40(Z1): 32-36.
- [65] 黄安荣, 韦良强, 孙静, 等. 多壁碳纳米管含量对聚丙烯/多壁碳纳米管介电复合材料性能的影响研究[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(3): 58-61, 66.
- [66] 张学锋, 吴东伟. 一种基于电压反馈运算放大器的微小电容检测电路[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(10): 112-116.
- [67] CHAI X Z, SU X B, GUX F, et al. Design and studies of c/v circuit for small capacitance measurement[J]. *Microelectronics*, 2010, 40(1): 70-73.
- [68] 王颖, 禹静, 李东升, 等. 单管计算电容式液位传感器的仿真与特性研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(6): 893-898.
- [69] 易艺, 宋爱国, 李会军, 等. 电容式触觉传感器微电容检测电路设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(5): 6-10.
- [70] 朱彦波, 石朋飞, 李光军. 基于开关磁阻电机的储能飞轮充放电控制[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(1): 155-161.
- [71] 曾君, 孙伟华, 刘俊峰. 基于可控开关电容充放电平衡的多路 LED 驱动器[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(18): 267-275.

作者简介

张洪朋, 博士, 教授, 主要研究方向为智能传感器技术、船舶污染防控技术、微流体芯片技术等。

E-mail: zhppeter@163.com

郑文博, 硕士研究生, 主要研究方向为机电一体化、传感器技术、微流体芯片技术。

E-mail: 464234031@qq.com