

电容式传感器应用综述

郭旭桂

山东化工技师学院，山东省滕州市，277500；

摘要：在现代工业生产生活中，传感器作为信息的最初收集环节而受到重视。在众多的传感器中，电容式传感器由于其传感原理而具有高灵敏度、非接触测量、可调性强、自干扰低等优点而获得广泛的应用。本文对电容式传感器的发展现状与应用场景进行综述。

关键词：电容；传感器；电容应用

DOI：10.64216/3104-9680.25.01.007

1 电容式传感器原理简介

电容式传感器依据电容值变化的决定因素，通过调整这些因素将外部物理量的变动转化为电信号，其基本原理公式可表达为：

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d = \epsilon A / d$$

依据该公式，电容式传感器的可调节参数包括三个主要变量：介电常数、有效极板面积 A 以及极板间距 d 。

对于变介质型电容传感器，其可视为两个不同单一介质传感器的串并联组合。通过合并运算，变介质型电容传感器的电容表达式可转化为初始电容 C_0 与介质变化引起的电容变化量 ΔC 之和。利用 ΔC ，观察被测量的变化变得更为便捷。

变面积型电容传感器通过将运动转换为电容极板有效面积的变化来测量运动等物理量，其具体公式如下：

$$\Delta C / C_0 = \Delta x / a$$

变极距型电容传感器由于电容值 C 与极距 d 成反比，导致单电容变极距式传感器的测量误差较大，量程也较小。为了克服这些缺陷，发展出了差动式变极距型电容传感器。在该设计中，动极板位于两块定极板间距的中位，形成两个电容式传感器串联的结构，实现了误差补偿与线性度的提升，进而提高了电容式传感器的测量精度。

2 电容式传感器的发展现状

由于电容的结构具有多样性，自二十世纪中叶以来，电容式传感器在经历数十年的发展之后产生多种不同的传感器类型。参考电容的不同类型，以及对电容结构的调整，电容式传感器大多分为以下几种：

2.1 平行板电容式传感器

作为电容器物理模型的典型代表，平行板电容器自电容式传感器设计初期便被应用于传感器的设计与实际应用中。尽管平行板电容式传感器的开放式结构使其易受外部电磁干扰等缺陷，但其价格低廉且在测量范围内精度较高的优点，使得平行板电容器的应用依然广泛。

鉴于平行板电容器的双电极板之间附加介质的结构特点，路新惠和卢易枫提出了通过设计子独立电容来改善用于测量板材厚度的平行板电容式传感器的测量精度的方法。具体而言，在待测物体两端各布置一块电容极板，从而将原传感器的单一电容转化为两个子电容串联结构。在不考虑被测材料厚度变化在内的其他因素影响的情况下，两个子电容的极板间距之和恒定，参考电容的决定式可知，两块子电容的串联等效电容量一定，从而减少因板材位置而造成的测量误差。

针对平行板电容器因开放结构以受外部电磁干扰的问题，浙江大学的刘雨露提出了利用 EDL 电化现象进行平行板电容式传感器的设计。EDLC 电容利用 EDL 效应产生的固液交界面传感现象实现传感器的传感功能。作者通过对 EDL 结构模型、EDLC 结构、电解质溶液以及设计与制备方案进行讨论，从而实现拓展平行板电容式传感器应用场景、提高传感器精度的效果。

为了提高平行板电容式传感器的测量性能，众多研究者提出了将平行电容式传感器与其他类型传感器联合使用的改进方案。沈阳工业大学的李明旭提出了将平行板电容式传感器与薄膜加速度敏感芯片联合使用的方案。在该方案中，作者首先分别对平行板电容器和加速度敏感芯片的性质进行考察，之后通过减小平行板电容器的极板面积来增强其测量范围性能，并参考极板面积变化对芯片固有频率的影响，以及上下

极板厚度变化、极板间距对传感器感应结构的性能影响,实现大量程加速度传感器的设计工作。

2.2 圆柱形电容式传感器

圆柱形电容器作为电容器的常见物理模型,因其几何特性,能够有效地测量圆柱形物体或介质,如管道,并且实现空间的集约利用。此外,该电容器由于其结构强度与刚度相对测量环境较高,能够避免自身固有频率对测量过程的干扰,适合于动态参数的测量。然而,其主要缺陷在于易受电缆电容及其他寄生电容的影响,因此在测量前需进行严格的屏蔽以减轻杂散电容产生的干扰。圆柱形电容式传感器的结构特点为电介质呈管状封闭于圆柱形极板内,适合采用改变介电常数的方法进行测量。

在圆筒形电容式传感器的设计方案中,天津大学的王奇提出将圆柱形电容式传感器应用于输油管道,以测量原油含水率。为降低寄生电容与漏电阻对测量结果的影响,王奇建议在外电极与内电极之间增设屏蔽层,形成电极-屏蔽层-电极的同轴结构,并通过屏蔽层在内电极与屏蔽层之间形成 0 电场,即内电极与屏蔽层等电势,从而消除寄生电容的干扰。

为实现传感器的系统化,天津科技大学的刘玉良等人提出将圆柱式传感器与基于 STM32 架构的微控制器单元(MCU)相结合的方法。该系统旨在测量微小位移,利用圆筒形电容式传感器作为测量头。测量头由外圆筒和内圆筒组成,内圆筒可进行轴向微小位移。当内圆筒轴向后移时,原电容式传感器转变为原介质电容与空气介质电容的串联结构。在 MCU 部分,为减少寄生电容干扰,采用处理器引脚对干扰信号进行有源屏蔽,以实现信号的保真。

2.3 交叉电容式传感器

交叉电容式传感器,又称交叉电极电容式传感器、计算电容式传感器。交叉电容的结构模型如下:取四个圆形电极,设直径为 d ,电极之间存在厚度为无穷小的介质。四个电极中,其中一个电极接电,另外三个电极接地作为屏蔽电极。为屏蔽外界电磁干扰与寄生电容,这四个电极又封装于一个屏蔽罩内

通过激光干涉精确测量电极之间极距,实现对电容量的精确测量。这种电容的特点在于电容大小仅和轴向长度和电极极距有关,故该结构能够减轻电容内外部干扰影响,因此在设计之初,这种电容即用于实验室精确测量。在这一电容诞生之初,这种电容由于造价昂贵而不被用于工业生产,但随着激光技术的进

步,交叉电极电容的测量精度进一步上升,其制造方法也趋于成熟,研究人员将交叉电容应用于电容式传感器的设计。

大连海事大学的张洪朋等人提出了一种基于交叉电容的润滑油油液杂质检测传感器的设计方法。具体来说,就是设计一个同轴管,之后在两个同轴管壁之间设计四个等间距的圆弧状电极,电极之间间距极小,并在间隙处填充聚四氟乙烯作为电介质,并以这四个电极组成交叉式电容器。由前所述,电容器的电容与电极截面参数无关,故电极形状的变化不影响传感器精度。在最内测管壁组成的管内通过待测油液,并通过电容量的变化以体现介质介电常数的变化,从而进一步分析待测油液的金属杂质情况。

3 电容式传感器的不同应用场景

电容式传感器的核心设计原理在于将外界物理量转换为距离(极板极距)、面积和相对介电常数这三个可以影响输出电容量的物理参数。因为可供用于转换的物理量较多,故电容式传感器可应用于多领域的测量工作。此外考虑到电容量在 SI 单位制下的标准单位较大,常用电容的电容量多为 μF 和 mF 级,故在外界扰动下电容量的输出变化幅度较大,虽然这表明电容式传感器易受外界干扰,但这也即表明在控制其他扰动和干扰的情况下,电容式传感器天然具有高灵敏度的优势。而在耗能方面,电容式传感器在工作时损耗的能量多为电磁场逸散、介质损耗和电极电阻损耗,这表明电容式传感器的能耗较低并且可以通过材料等科技的发展不断降低,适合于长期检测。除此之外,电容式传感器还具有响应快、可重复性良好等优势,因此电容式传感器大量应用于多领域检测。也因此,大量学者在电容式传感器的应用领域作出大量杰出的工作。

3.1 电容式传感器在液位测量领域的应用

基于电容变化原理,电容式传感器的设计可利用变电介质特性。鉴于传统电容模型由两块极板与极板间电介质组成,设计者可将待测液体引入极板间,形成以空气及待测液体为介质的电容并联结构,进而引起传感器电容值变化,通过检测电容值的变动实现液位高度的测定。本文将对电容式液位传感器的发展历程进行概述。

王兴等研究者来自中国民航飞行学院,他们针对燃油液位测量提出了创新的电容式传感器。在该传感器的研发过程中,研究团队对燃油介电常数变化等影

响因素进行了深入分析,并提出了相应的补偿策略,设计出能够补偿介电常数变化误差的电容式燃油传感器。该补偿结构的设计原理是在传统液位测量电容式传感器的基础上,额外增加一个用于测量燃油介电常数的电容。该测量电容的极板材料 and 外接电压与传感器电容保持一致,但其完全浸没于油液中,以消除油温不均等因素对介电常数测量的干扰,准确获取燃油介电常数,并将其应用于传感器电容的分析公式中。通过这种结构设计,传感器能够实现燃油液位的高精度测量。

马婷,来自西北师范大学的研究者,提出了一种基于玻璃管液位计的电容式液位传感器设计方法。该方法通过在玻璃管内壁附加三段极板,形成电容极板结构,从而减少液体对电容极板的挂壁效应。在无液体状态下,传感器电容以空气为介质;随着待测液体液位的上升,部分电容区域转变为以待测液体为介质,导致传感器总体电容发生变化。针对这一变化,作者对单位长度空气介质和待测液体介质在特定测量条件下的电容量进行了详细研究,从而精确计算出液体液位高度。该结构设计有效降低了挂壁现象带来的测量误差。

3.2 电容式传感器在柔性压力传感器设计领域的应用

经研究电容式传感器的工作原理,发现通过调整电容极板间距,可使传感器输出不同的电容值。基于弹性材料受力形变的原理,力学量的变化可转化为极板间距的位移变化,进而引起电容值的变化,实现电容式柔性压力传感器的设计。

温州大学的研究团队,以魏国为首,采用微纳制造技术对柔性压力传感器的电介质层进行了创新性改进。该研究团队提出的传感器方案,采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为介质层,并在其中构建了毫米级圆柱阵列。相较于传统平行板式柔性传感器,该设计在相同受力条件下显著增加了极板间距的变化,从而提升了传感器输出电容值的变化量及灵敏度。此外,通过采用极板-无圆柱 PDMS 层-附加圆柱结构的 PDMS 层-极板的结构,有效减少了电介质圆柱层在重复测量过程中的损耗,确保了传感器的精度和重复性。

合肥工业大学的研究人员,以刘平为首,通过引

入新型膜材料,实现了更高灵敏度的柔性压力传感器。其创新之处在于采用 PVA-KOH 离子膜作为电介质层。其中,PVA(聚乙烯醇)作为离子膜的基材,KOH 溶液提供氢氧根阴离子和钾阳离子,PVA 膜则用于隔离这些阴阳离子。研究指出,在不击穿膜的情况下,离子浓度的增加会导致离子膜介质的介电常数增大,进而提供更大的电容输出值和变化量,从而提升传感器的灵敏度。

4 结论

本文综述了电容式传感器的结构改进和应用场景的研究现状。重点介绍了应用于传感器设计的三种电容类型及其改进方案的最新成果,总结了在两种典型应用场景下的最新设计思路。根据对最新研究的考察,提出了下列可作为进一步深化改进的研究方向:

利用电化学相关领域进行新型电容式传感器的设计开发工作,并且保证此类电容器的性能不因电化学效应的失控而发生劣化;

电容式传感器因为其开放结构和外接部件的寄生电容或会产生一系列干扰和误差,可通过对结构的优化以改进传感器精度;根据材料等领域的新进展,开发基于新材料和新结构的高精传感器。

参考文献

- [1]路新惠,卢易枫.改进型电容式测厚仪的研究[J].科技创新与用,2015,(23):79.D0I:10.19981/j.cn23-1581/g3.2015.23.054.
- [2]刘雨露.基于界面双电层电容的新型传感器研究[D].浙江大学,2023.D0I:10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.000516.
- [3]李明旭.电容式联动薄膜加速度敏感结构设计[D].沈阳工业大学,2022.D0I:10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.001130.
- [4]王奇.基于电容法的原油含水率在线测量技术研究[D].天津大学,2021.D0I:10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.002444.
- [5]刘玉良,叶扬扬,孙维一,等.基于STM32微控制器的电容式微位移测量系统的设计[J].天津科技大学学报,2022,37(06):38-44.