

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416839

微弱电容检测电路研究进展综述*

刁媛¹ 贾远东² 金新人¹ 李红信¹ 李宗峰³(1. 兰州大学信息科学与工程学院 兰州 730000; 2. 兰州大学物理科学与技术学院 兰州 730000;
3. 中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

摘要: 在精密测量、工业检测等领域中,由于待测电容变化量非常微小,可能达到皮法量级甚至更低,因此需要电容检测电路捕捉这些微小电容变化。本文分析了微弱电容检测的基础原理,区分了二极管式、调频式、交流式、充放电式和谐振式五种电容检测电路,通过测量精度、功耗等方面的对比分析,归纳了各类方案的特性优劣及其适用场景,并列举了典型应用案例。在综述当前电容检测方法的基础之上,探讨了当前微弱电容检测电路的局限性、需深化研究的方向及发展趋势,期望能够推动电容检测技术的进一步发展。

关键词: 微弱电容检测;电容式传感器;电容检测电路;分辨率;电路应用

中图分类号: TN721.5;TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Review of research progress in weak capacitance detection circuits

Diao Yuan¹ Jia Yuandong² Jin Xinren¹ Li Hongxin¹ Li Zongfeng³

(1. College of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. College of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Center for Space Application Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In fields such as precision measurement and industrial testing, due to the extremely small changes in the capacitance to be measured, which may reach the order of picofarads or even lower, capacitance detection circuits are needed to capture these small capacitance changes. This article analyzes the basic principles of weak capacitance detection, distinguishing five types of capacitance detection circuits: diode type, frequency modulation type, AC type, charge discharge type and resonant type. Through comparative analysis of measurement accuracy, power consumption and other aspects, the characteristics, advantages, disadvantages and applicable scenarios of each scheme are summarized, and typical application cases are listed. On the basis of summarizing current capacitance detection methods, this paper explores the limitations, directions for further research and development trends of weak capacitance detection circuits, hoping to promote the further development of capacitance detection technology.

Keywords: weak capacitance detection; capacitive sensor; capacitance detection circuit; resolution; circuit application

0 引言

电容检测技术是将电容值转化为可观测和测量的信号形式,如电压、电荷或频率等,以实现精确的电容值检测,为准确反映微弱电容的变化,通常会引入一种经过偏置的交流信号作为参考^[1-2]。目前,微型电容式传感器(毫米或微米级别),已被广泛运用于航空航天、医疗和机械制造等领域。与此同时,微弱电容检测电路也被广泛应用在各类传感器中,比如微加速度传感器、微陀螺仪和微压力传感器等^[3-4]。因此,研发更为精准、低噪声的电容检测电路,具有

深远的科学和实际意义。本文综述了5种电容检测电路,探讨了它们的发展历程,并分析了其结构、工作原理、优势及应用场景。

1 电容检测理论分析

1.1 电容检测原理

电容检测的核心在于将外部的待测量转化成可检测的电容信号,再利用电路监控电容变化,从而获取所需信息。电容传感检测通常包含固定电极和可动电极^[5]。如图1所示,固定电极和可动电极分别分布于该微结构的上下两侧

收稿日期:2024-09-08

* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2204101)项目资助

和中间。当可动电极保持原位时,电容对应微结构的初始间距 d ;当可动电极移动位移 x 时,有^[6]:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{1}$$

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{d-x} = C_0 \frac{1}{1-\frac{x}{d}} \tag{2}$$

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{A}{d+x} = C_0 \frac{1}{1+\frac{x}{d}} \tag{3}$$

式中: A 是电极面积, ϵ_0 是极板间介质的介电常数。

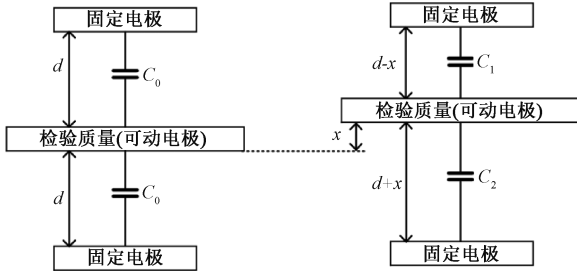


图 1 电容检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capacitance detection

因此,差分电容的大小可计算得:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \frac{x}{d} \tag{4}$$

可见,当外部环境中的待测参数导致可动极板位置发生变动时,相应的电容值也会改变。通过检测电容的大小可以间接衡量待测量的实际变动情况。

1.2 电容检测国内外研究动态

电容式传感器的工作原理,首在于其敏锐地捕捉非电量信号,随后将其转化为电容量的变动,再经专门的信号调

理电路处理,最终转化为一种更便于输出与深入分析的信号形态^[7]。在整个过程中,电容检测电路扮演至关重要的角色,它如桥梁般连接传感器与信号处理电路,精准地将传感器捕捉到的原始信号转换为后续处理所需的电信号^[8]。微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术将电容式传感器引入了微型化发展方向。

1) 国外电容检测研究现状

20 世纪 60 年代,随着集成电路制造技术的推进, MEMS 技术开始萌芽,首款硅微压力传感器、硅加速度计等标志性产品的问世,象征着微机电系统领域的初步探索与布局。到 20 世纪 80 年代,微传感器的应用领域拓宽,相继出现微机械喷墨头、硅微静电马达等新技术^[8]。进入 21 世纪, MEMS 技术发展速度大大加快,不仅测量范围与分辨力逐步提升,在追求精确度的同时,噪声和功耗也实现大幅降低。如 2016 年,用于检测地球潮汐的重力仪实现了 $40 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的本底噪声^[9]; 2020 年,跷跷板摆式的加速度计本底噪声降至 $22 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$,量程为 $\pm 0.55 \text{ g}$ ^[10]。

如今,微弱电容检测的正逐步向集成化方向靠拢,逐渐涌现专用的微电容检测芯片,为各种高精度测量和控制系统提供稳定而可靠的支持。几款卓越的微电容检测芯片性能举例如表 1 所示。

2) 国内电容检测研究现状

自 20 世纪 90 年代起,我国开始对 MEMS 技术进行了深入研究与开发。如今,清华、北大、天大、华科大、上海微系统研究所等高等院校和研究中心都在积极参与 MEMS 技术的研发工作^[8]。尽管各学校和研究单位已经取得了一些有关电容式位移传感器的突破性的研究进展^[11-13],然而实际市场上的成熟产品仍不足。几种电容位移传感器性能对比如表 2 所示。

表 1 几款卓越的微电容检测芯片性能举例

Table 1 Examples of excellent microcapacitors detection chips' performance

芯片型号	生产厂家	测量精度	测量范围
AD7747	美国 ADI 公司	10 fF	0~17 pF
MCP62	敏源传感	1 fF	0~150 pF
HT133	德国 GEMAC 公司	0.16 fF	0~30 pF
MS3110	美国 Irvine Sensors 公司	4 aF	0~17.5 pF
CMOS-MEMS 加速度计	美国卡内基梅隆大学	0.02 aF	$10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ fF}$

表 2 几种电容位移传感器性能对比

Table 2 Performance comparison of several capacitive displacement sensors

生产厂家	型号	量程/ μm	分辨力/nm	频响范围/kHz	非线性误差/%
美国 Wayne Kerr	DM100B	0~25	0.01	0~2.5	± 1.00
英国 Queensgate	ZNXsensor	0~20	0.10	0~5	± 0.02
德国 PI	D-015	0~10	0.01	0~3	± 0.50
日本 ONOSOKKI	VT-510	0~500	0.10	0~3	± 1.00
天津大学段发阶团队	JDC-III	0~100	1.00	0~2	± 1.00

比较发现,我国的电容位移传感器在分辨力、稳定性和频率响应等方面还有较大的提升空间。

2 5 种微弱电容检测方法

由于半导体制作工艺的提升,电容传感器尺寸逐渐减小,使得它们的电容值通常处于 pF 量级,可以测到 fF 甚至 aF 量级的电容变化,属于微弱电容检测领域。依据不同的探测方法,现有的电容测量技术包括:二极管式^[14]、调频式^[15]、交流式^[16]、充放电式^[17]、谐振式^[18]等。

2.1 二极管式电容检测电路

该电路的重要特点是利用高频载波信号将差分检测电容调整到高频范围,将电容信号转换为电荷信号。再通过环形二极管装置对电荷信号进行解调和重塑,最终获得电路输出的电压信号,该信号与差分电容信号之间保持比例关系^[19]。

图 2 显示了环形二极管电容检测电路的结构,由胡湔等^[20]提出。其设计理念来源于方波激励,通过在可动电极上加入激励方波,实现电容 V 电压的转换。但最终输出电压会因为电容差 ΔC 造成误差,若 ΔC 较大,会对加速度计输出零位造成明显影响。

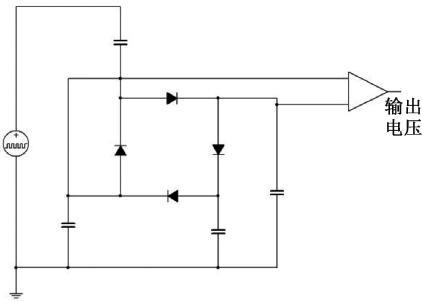


图 2 二极管式电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of diode circuit

优化工作由周晓桐等^[21]完成,环形二极管电容检测电路的分辨率实现了重大突破,电路结构如图 3 所示。在测试环节,信号源 U_s 通过 C_1 和 D_1 给 C_3 充电,通过 D_3 和 C_2 完成 C_3 的放电。由于 C_1 、 C_2 的差异导致充放电电量不同,电荷积累于 AD8221 的同相输入端形成电势。同理,运放的反相输入端也会产生电势。该电势大小与 C_1 、 C_2 的差值成正比,进而实现差动电容检测。优化后电容检测分辨率可达 20.0 aF,单位带宽下的分辨率可达 $0.258 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

基于环形二极管解调的微弱电容检测系统,林瑞^[22]研究出一种新的读取电路,可在高分辨率、宽电容范围内运行,适用于 MEMS 电容式加速度计。该电路能有效地读取静态电容范围为 $5 \sim 10 \text{ pF}$ 、动态电容为 $1 \sim 4 \text{ pF}$ 、频率为 $200 \sim 2 \text{ kHz}$ 的电容信号,并将其转换为相应的电压信号。在 $200 \sim 2 \text{ kHz}$ 的频率范围内,芯片的等效输入噪声可降至 $659 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平,同时实现 5 aF 的电容分辨率,为电容检测技术的发展开辟了新的途径。

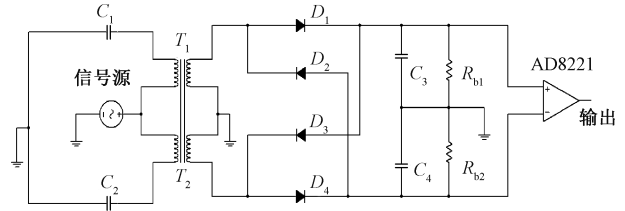


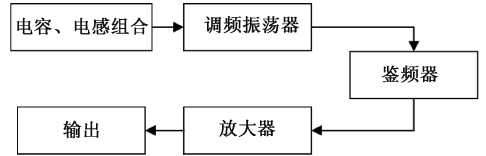
图 3 改进后的环形二极管电容检测电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of improved ring diode capacitance detection circuit

此外,二极管桥式电路凭借其其对电容极板间距细微变动的敏锐捕捉能力,使得电容薄膜真空计的精度得到了显著提升。康恒等^[23]的设计核心在于电感-电容(logic circuit, LC)或电阻-电容(resistor-capacitance circuit, RC)振荡电路与二极管桥电路的巧妙结合,共同构建检测电路,从而实现对电容值的精确测量。该电路摒弃了仅依靠振荡电路检测电容的传统方法,引入二极管桥式结构,通过测量差分电容,有效抑制共模杂散电容的干扰;且负反馈补偿方法的引入,有效解决了电容-电压转换过程的非线性问题。该电路灵敏度达到 1.85 V/pF ,非线性度为 0.4% 。

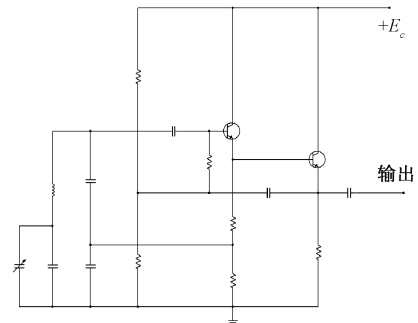
2.2 调频式电容检测电路

图 4 为调频式电路结构图,图 4(a)展示了调频式电容测量电路的工作过程,图 4(b)为调频式电容传感电路典型结构。首先将电容传感器连接到 LC 谐振系统内,然后利用调频技术,把电容量转换成频率值,再经由鉴频设备进一步转变为包含有关变动的电压信号,通过后续的电路环节提取出与之相关的电容量数据^[24]。



(a) 调频式电路工作过程

(a) Working process of frequency modulation circuit



(b) 调频式电容传感电路典型结构

(b) Typical structure of frequency modulation capacitive sensing circuit

图 4 调频式电路结构图

Fig. 4 Structure diagram of frequency modulation circuit

代表性研究为龙成等^[25]提出的一种基于超外差调频

接收技术的测量方案,这一创新方案的核心目标在于攻克杂散干扰这一技术难题,同时还为解决调频式检测电路中常见的噪声干扰与温度漂移等挑战提供了切实有效的路径。经实验验证,该方案在叶片叶尖间隙检测的实际应用中展现出了卓越的性能和实用价值。

Zhu 等^[26]提出利用电容充电原理来实现频率转换的创新方案,可以检测 fF 至 pF 量级的电容,且检测误差降至 2%,是推进调频式电容检测系统发展的重要一步。

随后,Nikolov 等^[27]开发了一套多频电容特性测试系统,将传统测量仪器的精确性与高级编程环境的灵活性相结合,构建了一个功能全面的电容测量解决方案。这一创新有助于应对更复杂的测量需求,可检测 pF 量级的电容。

此外,张振华^[28]设计了基于 LC 调频电路的电容检测模块,在元器件选型、连接线路等方面提出改进,随后结合配套的现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)主控板,搭建用于激光切割的高精度电容调高系统。经验证,电路 0~90 min 内的相对频率稳定度为 1.5×10^{-5} ,符合 LC 电路的最佳频率稳定度范围,对应到 3 mm 内的位移分辨率也小于 0.1 mm。

Tyagi 和 Sumathi^[29]结合相位锁定环、频率锁定环、离散傅里叶变换等多种频率估计技术来实现电容的间接测量。该电路抗干扰能力强,适合信号长距离传输,同时其高度的可移植性使得它能够轻松融入各种数字电路系统中,但也面临寄生电容的干扰,并且需要额外的电路读取频率的变化。

2.3 交流式电容检测电路

主要的交流式(alternating current, AC)微弱电容传感信号检测技术包括交流激励式、AC 运放式和 AC 桥式^[7]。

1) 交流激励式电容检测

此种电路通过施加交流激励信号并经过检波器转换,得到与待测电容容值成比例的输出电压值^[30],原理图如图 5 所示。

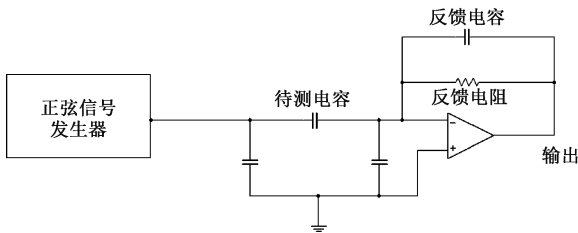


图 5 交流激励式电容检测电路

Fig. 5 Communication incentive capacitor detection circuit

分析电容层析成像系统关键技术时,刘诗源^[31]使用了基于交流激励的微小电容测量电路,经过测量、放大、整流、滤波模块后获得输出信号。瞬态仿真时间设置为 $0.5 \sim 5 \mu\text{s}$ 的同时,被测电容从 $1 \sim 4 \text{ pF}$ 逐一仿真分析,得到的结果与预期相符。

谢琦等^[32]提出一种有源可调电容,采用电容-电压转

换法实现电容检测,借助正弦激励信号将电容信号转换为电压信号。经仿真分析,可调电容在 $20 \sim 300 \text{ pF}$ 范围时,精度可达 0.2 pF ,高于常规无源可调电容。

杨升琦^[33]聚焦于球面运动副二维角运动信号的检测,通过集成交流激励式微弱信号检测与互相关解算技术,可解算电容达到 fF 级,实现了检测球面电容传感器所输出的细微角度。且经过安装误差消减分析,补偿后传感器在 45° 和 150° 方向上的非线性误差分别降低至 0.975% 和 0.837% 。

2) AC 运放式电容检测

该电路利用运算放大器来实现功能,它的突出优点在于输入的机械位移和输出的信号之间能保持稳定的线性关系,这通过图 6 得到了形象的展示。随着被测电容值的增加,输出电压随之升高。通过准确测量这一输出电压,就可知被测电容的数值。但这种方法有一前提,即需要保证标准参考电容的稳定性和准确性,同时运算放大器本身还可能因温度变化而导致精度下降^[34]。

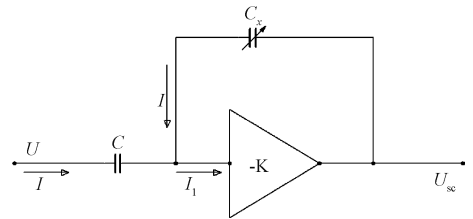


图 6 运算放大器电路

Fig. 6 Operation Amplifier Circuit

张学锋和吴东伟^[34]提出一种精密的微小电容检测体系。如图 7 所示,在交流信号的正半周期,系统进入跟踪模式,通过 D_2 对 OA_3 同相输入端的电容进行充电,以保持 OA_1 输出端信号的峰值;当交流信号转入负半周期时,系统切换到保持模式,此时二极管截止,使 OA_3 同相输入端的电容两侧电压保持稳定,因此其输出端也恒定,从而实现对 OA_1 输出信号峰值的检测。为进一步提高检测精度,加入 RC 低通滤波器。该系统能将 $0 \sim 30 \text{ pF}$ 范围内的电容变化值转换为直流电压输出,灵敏度为 99.8 mV/pF 。

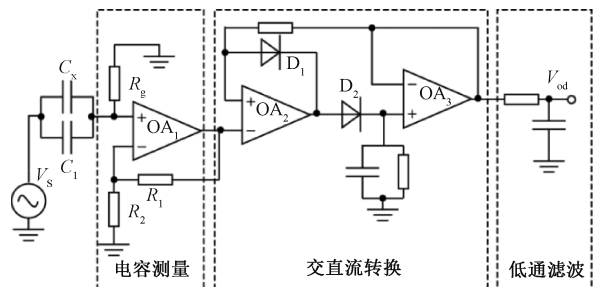


图 7 电容检测电路原理图^[34]

Fig. 7 Schematic diagram of capacitance detection circuit^[34]

龙航^[35]对电容层析成像传感器展开研究,该系统主要包含:电极开关阵列、电容-电压(capacitance-voltage, C-V)

变换单元、差分放大电路、模拟数字转换器 (analog-to-digital converter, ADC)、数字模拟转换器 (digital-to-analog converter, DAC)、微控制器和通信电路。其中,交流式电容检测电路具备优异的抗杂散电容能力、高精度的分辨率、广泛的电容检测范围、低信号漂移和高信噪比,保证了电容层析成像技术 (electrical capacitance tomography, ECT) 数据采集系统的稳定性和准确性。该电容信号采集电路灵敏度为 64 mV/fF,分辨率高达 4.8 aF。

3) AC 桥式电容检测

电桥法应用较为广泛,核心原理是将被测电容作为电桥的一臂,另一臂采用固定电容,或电桥两个相邻臂都装有待测电容,其余两臂放置其他部件,通过调整来减小寄生电容的影响。因桥路的组成不同又可细分为:有阻容电桥、T 型电桥、变压器电桥等^[32]。

(1) 有阻容电桥

阻容电桥包含待测电容和可调参考阻抗,保持桥臂的信号源频率与电压匹配。通过调节参考阻抗来实现电桥的平衡状态,此时待测电容与参考阻抗呈共轭相等的关系,如图 8 所示,即 $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ 。

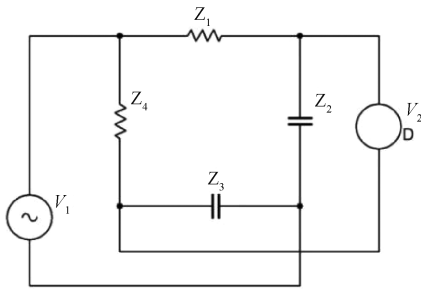


图 8 有阻容电桥
Fig. 8 Resistive capacitive bridge

AC 电桥式电容检测方法源于 1940 年,最初是将传感器接入电路直接传递信号至处理器,但由于未经处理导致精度较差,因此,Kolle 和 Leary 提出一种优化的检波方法,如图 9 所示。该系统利用电容的阻抗和容抗特性,其中,MDACB 的参考电压来自经过电容传感器处理后的激励信号。若 DDS 输出与激励信号同频余弦波,可以通过使用低通滤波器提取出容抗部分相应的电压;若 DDS 输出与激励信号同频正弦波,则能获取阻抗部分相关电压,由此反应电容值。实验结果显示,在 100 kHz 的激励源作用下,测量有效区间为 50~600 pF,且复测时偏差极低,不超过 0.005%,显著提高了电容测量的准确性与稳定性^[36-37]。

随后,Mantenuito 等^[38]提出一种改良 De-Sauty 电桥,通过压控电阻和反馈回路,在其余元器件参数未知的情况下就可估测电容变化范围。因其测量范围较广(81 pF~1.1 μF),可用于湿度测量。

(2) T 型电桥

由于传统电路的噪声主要由反馈电阻的热噪声引起,

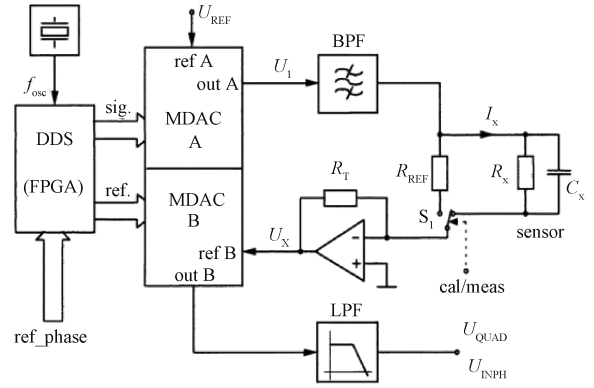


图 9 交流激励式测量原理图^[36]

Fig. 9 Schematic diagram of communication incentive measurement^[36]

会造成电路性能的不稳定和误差增加,因此出现 T 型网络结构,如图 10 所示。为解决交流激励式电容-电压转换电路中因大反馈电阻热噪声而产生的温度漂移问题,采用小电阻的方法。同时,利用驱动电缆技术可以去除寄生电容带来的干扰,从而保证电容信号到交流电压信号转换的精确度^[39]。这一策略有效地克服了传统方法中的不足,显著提升了整个系统的稳定性和可靠性。

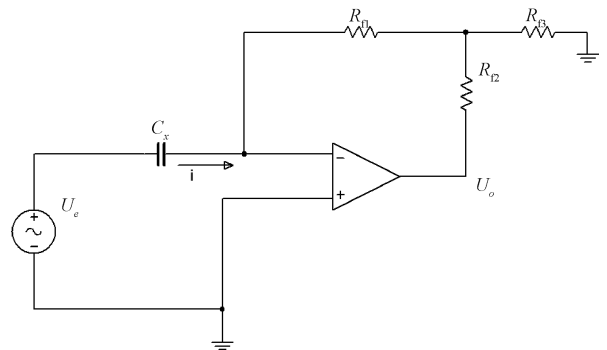


图 10 改进的 AC 桥式电容检测电路原理图

Fig. 10 Schematic diagram of improved AC bridge capacitance detection circuit

邢本凤^[39]在电路中引入 T 型网络结构。该微弱电容检测系统的整体电容分辨率高达 0.25 fF,显示出 0.7 mV/30 min 的稳定性能,且非线性误差仅为 1.84%。冯佳^[36]改进出一种无需调整到桥平衡即可实时测量的新型交流激励式电容检测前级电路,示值稳定性为 0.1 mV/30 min。

为解决平板电容传感器在输出方面存在的非线性问题,付连壮等^[40]设计了一种高灵敏度的电容检测电路,如图 11 所示。这一电路以有源电桥和运算放大器技术为依托,不仅实现了输入阻抗的显著提升,更通过增强放大倍数,使电路的分辨率和线性性能得以质的飞跃。此外,运用运算放大器 OP1 的虚地处理技术,将原本可能对测量结果产生干扰的杂散电容影响降至最低。通过标定,其测量范围在 0~30 μm 内,线性度为 0.05%,分辨力优于 0.01 μm。

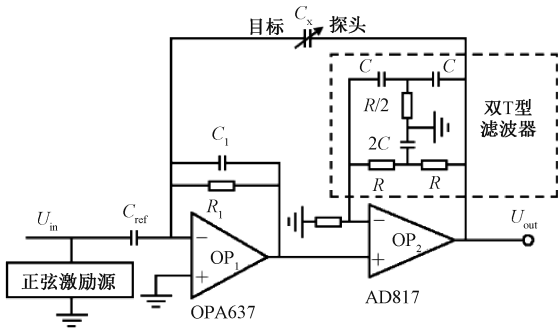


图 11 双 T 型精密电容检测电路^[40]

Fig. 11 Double-T precision capacitance detection circuit^[40]

(3) 变压器电桥

变压器桥式电路结构如图 12 所示。 C_1 、 C_2 为一对对待测电容， C_{p1} 、 C_{p2} 为谐振调谐电容， C_{a1} 、 C_{a2} 为驱动电容，差动电容信号经变压器、跨阻放大器后得到两路电压信号，通过对电压差的检测，即可反应出电容差值。

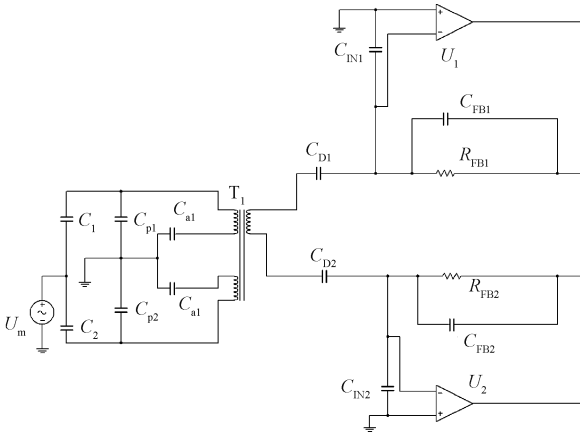


图 12 变压器桥式差动电容检测前端电路

Fig. 12 Transformer bridge differential capacitance detection front-end circuit

图 12 展示了 Mance^[41] 提出的变压器桥式差动电容检测前端电路。此电路在低于 10 mHz 的频率下展现了低于 $1 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电感性传感噪声性能和优于 $2 \text{ ppm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的驱动振幅稳定性，因此成为了后续研究的基础。例如，高诗梦等^[42] 对此电路的输出阻抗最大化条件及桥路参数选择进行了深入研究；Xie 等^[43] 制造了一个在宽频带上表现良好的变压器，注入正弦波振幅为 0.6 V 时，在 200 kHz 的谐振频率下可产生 $0.11 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电容分辨率；贺晓霞等^[44] 建立了基于差动电容的位移检测电路模型，当电路工作在零点附近，20 kHz 内的噪声小于 $2 \times 10^{-6} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，对应电容检测分辨率为 $2.93 \times 10^{-5} \text{ pF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

(4) 差分电容检测电路

差分电容检测电路的典型结构由顾英^[45] 提出，如图 13 所示。差分电容传感器的上下极板 C_{p1} 和 C_{p2} 分别接在晶

体管 BG1 和 BG2 的发射极上，基准三角波发生器把一个随时间变化的电压信号 du/dt 分别加到晶体管 BG1 和 BG2 的输入端。经推导，差分电容检测器的输出电流与可变电容 C_{p1} 和 C_{p2} 之差成正比，与加在电容器极板两端的电压变化率成正比，故能检测差动电容变化。顾英将该结构引入石英挠性加速度计，在后续研究中得到广泛的应用。

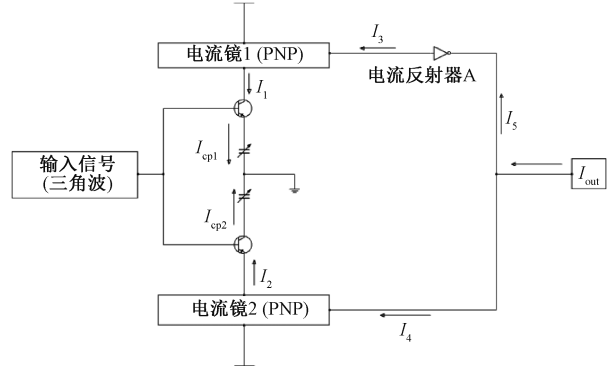


图 13 差分电容检测电路

Fig. 13 Differential capacitance detection circuit

刘孟良^[46] 结合单端电容读出电路与拟差动式电容读出结构，创新地提出全差分开环电容检测读出电路结构。全差分折叠式共源共栅的直流增益为 118.2 dB，单位增益带宽达到 14.2 MHz，相位裕度为 73.3° 。将该结构应用于全差分电容式传感器，灵敏度为 $0.56 \sim 13.3 \text{ mV}/\text{fF}$ ，分辨率为 50 aF。

潘宇翔^[8] 设计了一种全差分运算放大器，该放大器在电容-电压转换和采样/解调模块中表现出色。这款检测电路系统具有优越的噪声抑制能力和良好的线性度，采用可编程电容阵列进行非线性补偿和失配补偿，并可适应不同大小的静态电容。经过仿真测试，该电路的 -3 dB 带宽超过 25 kHz，在 100 Hz 处的噪声表现为 $3.6 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，能处理 10~100 pF 范围内的静态电容。

2.4 充放电式电容检测电路

1) 开关式电容检测

开关型电容检测法本质上是一种充放电式检测方法，主要包括高速模拟开关、电荷放大电路、采样保持跟随器等部分，通过控制开关对被测电容充放电。Fielden 开发的电荷转移装置就是一个典型实例，如图 14 所示， S_1 导通时，直流电压 V_c 对目标电容 C_x 充电； S_2 导通时目标电容放电，电量经检测器转换为电压输出。采用差分结构的电路减少公共输入端的漂移至 $0.01 \text{ pF}/10^\circ\text{C}$ ，降低温度变化对电路的影响，保持测量精度。这种设计有助于在不同条件下保持精确的测量结果^[47]。

MEMS 数字陀螺仪中，开关电容检测电路的核心设计理念在于采用全差分电容检测方式，其中，前置的开关电容放大电路、信号处理电路以及若干辅助电路，共同为检

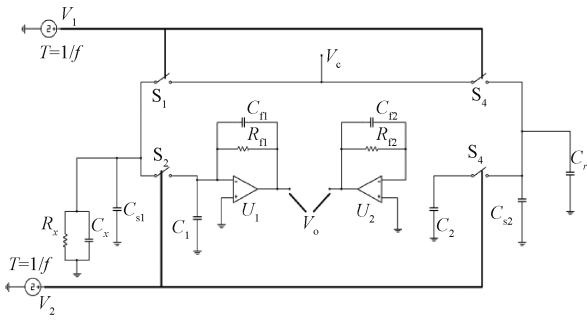


图 14 充放电式测量电容的原理示意图

Fig. 14 Schematic diagram of charge-discharge measuring capacitance

测工作提供支撑。图 15 体现了开关电容检测电路构造,能够精确捕捉机械敏感结构因力作用而产生的电容差并转化为电压信号,进而为次级放大器所接收,再传递至后续的信号处理电路,经历解调后,最终输出为连续且稳定的电压信号^[48]。对于检测电路,仿真得到刻度因子为 28.81 mV/fF,补偿后分辨率为 7.76×10^{-9} ,整体功耗为 9.935 mW。

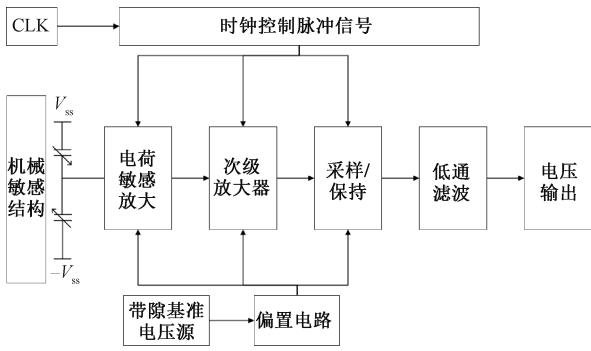


图 15 检测电路整体结构框图

Fig. 15 Block diagram of overall structure of detection circuit

2) 电荷放大式电容检测

电荷放大式电容检测电路包含电荷放大部分、采样保持部分和仪表放大部分。图 16 展示了这些部分的分布: U_1 为电荷放大部分, Q_1 、 Q_2 构成两路采样保持部分。其工作原理是,通过精确控制各开关的通断,实现对目标电容 C_x 的充电和放电,进而准确测量其电容值^[7]。

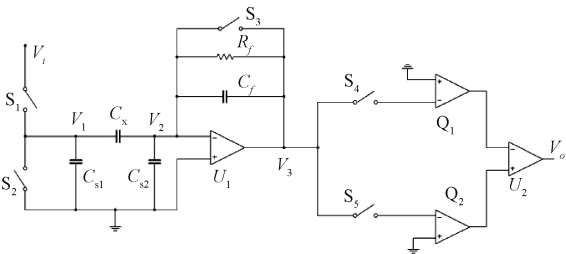


图 16 电荷放大式电容检测电路

Fig. 16 Charge amplification type capacitance detection circuit

针对如何降低分布电容对于差分电容式加速度计测量的干扰问题,黄昱^[49]借助充放电方案加以完善。他在设

计中引入了等电势屏蔽技术来保护从表头连接到测量电路的线缆不受损坏。另外,开发了一种基于四周期采样的算法,控制不同测量阶段接入的电容,得到多个相关测量结果,从而有效地减少了分布电容带来的误差。实验证明,这种四周期采样方式使零位移偏移的消除效果比单一周期采集提升约 4%,并且能够把分布电容引起的误差减小到原始分布电容值的 3% 以内。

王磊^[47]针对低功耗、高分辨率等多重技术指标所提出的需求,深入探索了充放电式电容位移传感电路的改进策略。他提出并联基准源方案,核心思想在于通过优化电源配置,提升电路的分辨精度,使得传感电路在 0.1 Hz 附近分辨率 2.2×10^{-7} pF/ $\sqrt{\text{Hz}}$,功耗控制在 0.341 W。

黄苏平等^[50]也对电容充放电测量法进行了深入的改良研究。他们利用互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺,设计了一款全新的微小电容检测电路,特色在于其创新的电压并联负反馈机制,使得该电路的分辨精度达到 5 fF 水平。

2.5 谐振式电容检测电路

谐振法的基本原理是,将可调频率电源接到被测电容两端,再与固定电感形成谐振电路。此电路的谐振频率由电容和电感的参数共同确定,通过测定谐振频率推算出电容的具体数值^[51]。图 17 展示了这种检测方法的原理图,图中输入信号的频率为 ω_c , 两路对称的检波器回路谐振频率为 ω_1 、 ω_2 , 满足 $\omega_c = (\omega_1 - \omega_2)/2$ ^[51-52]。

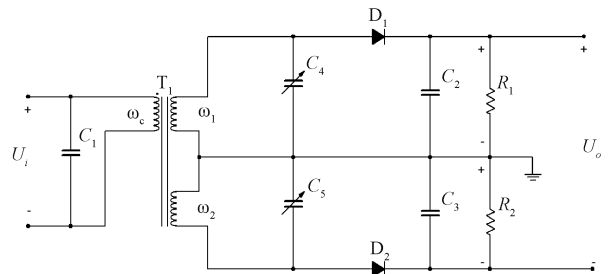


图 17 谐振式电容检测电路

Fig. 17 Resonant capacitance detection circuit

赵飞等^[53]深入探讨了基于分离圆柱体谐振腔法的材料复介电常数测量系统,鉴于该系统在测试频率方面存在的明显局限,尤其是偏低的频率,他们提出一套最优频率测试策略以及相应的校准技术,为系统的完善和发展提供了新的思路。

鲁涛^[54]聚焦于高精度与高环境耐受性 MEMS 谐振式压力传感器的应用需求,深入设计并研究其闭环接口电路技术,旨在提升传感器的性能与可靠性。其中,跨阻放大器部分在 100 kHz 处的等效输入电流噪声约 360 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$,反馈补偿电容设计为 400 fF,接口电路芯片在 100 kHz 处实现了 0.47 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的等效输入电流噪声。

此外,也有借助现有电容-数字转换芯片,搭建高精度

电容测量模块的方案,应用于 A4 纸张页数测量^[55]、液压油多污染物微检测^[56]、区分气泡和金属颗粒^[57]等方面,旨在弥补传统模拟电路设计复杂、测量范围小等局限性^[58]。

3 电容检测方法分析比较

表 3 和 4 对比了 5 种电容检测电路的性能。

表 3 几种电容检测电路的比较

Table 3 Comparison of several capacitance detection circuits

参数	二极管式 电容检测电路	调频式 电容检测电路	交流式 电容检测电路	充放电式 电容检测电路	谐振式 电容检测电路
测量精度	中	低	高	高	低
功耗	低	中	高	中	中
适用频率范围	低	中	中	高	低

表 4 几种电容检测电路的优缺点分析

Table 4 Advantages and disadvantages analysis of several capacitance detection circuits

电容检测电路	优点	缺点
二极管式电容检测电路	(1) 电路结构相对简单,功耗小; (2) 信噪比较高; (3) 线性优良; (4) 解调方便,适用于 ADC 处理。	(1) 输出信号易失真; (2) 寄生电容影响灵敏度。
调频式电容检测电路	(1) 测量频率范围较宽,灵敏度高; (2) 抗电磁干扰能力强,频率响应迅速; (3) 输出信号易于数字化处理。	(1) 非线性误差较大; (2) 输出信号需采取稳频措施; (3) 难以满足系统可靠性的需求。
交流式电容检测电路	(1) 驱动电缆技术可消除电缆的分布电容; (2) 精度高,信噪比高,寄生电容影响小; (3) 灵敏度高,稳定性好。	(1) 电路无法自动平衡电桥; (2) 需要相敏检波单元提高可靠性; (3) 对运算放大器和固定电容的特性要求极高,频率可能受限。
充放电式电容检测电路	(1) 结构简洁,能抑制杂散电容的干扰; (2) 经软件补偿后稳定性高,数据获取迅速; (3) 测量结果稳定,可大幅度提高数据采集速率。	(1) 直流放大方式存在较大的漂移现象; (2) 充放电过程受电荷注入效应的影响; (3) 非理想放大器漏电流、偏置电流等会影响测量结果,随着时间的推移,误差越来越大,直至放大器完全饱和。
谐振式电容检测电路	(1) 在特定的频率范围内有较高的灵敏度; (2) 不用参考电容即可实现单电容变化检测; (3) 易于数字化输出。	(1) 实时性和稳定性不高,不适于自动化和在线测量; (2) 输出线性度不高,对频率的要求高; (3) 易受寄生电容的影响,环境适应性较差。

4 各种类型的应用

目前,以电容检测电路为核心的电容式传感器被农业、工业、制药、计量、军事侦察、环境监测、航空航天等领域广泛采用,待测变量主要通过间距、面积或介电常数反应。

4.1 应用范围

几种电容检测电路的应用如表 5 所示。

4.2 典型应用案例

1) 陀螺闭环检测

一种串联相位校正检测闭环系统控制器,可以有效解

决硅基环形波动陀螺动态性能不佳的问题。该控制器采用了比例积分微分与惯性环节相结合的方法。外围测试电路如图 18,其中,驱动闭环电路借助环形二极管实现电容检测的功能,进而反应出陀螺仪的工作模式信息。经实验,采用闭环控制后,陀螺仪达到稳定输出的时间约为 0.15 s,其位移检测精度相较于开环状态提升了 97%,同时标度因数由 0.74 mV/°·s⁻¹ 显著提升至 8.16 mV/°·s⁻¹^[59]。

2) 电容层析成像

作为整个 ECT 系统的关键部分,ECT 数据采集系统必须能够有效地从大量背景噪声中捕捉微弱电容信号,并传输到处理计算机中。如图 19,该检测系统的设计涵盖了

表 5 几种电容检测电路的应用
Table 5 Application of several capacitance detection circuits

电容检测电路	典型应用场景
二极管式电容检测电路	(1) 二极管工作状态测试 (2) 峰值检测器 (3) MEMS 陀螺仪
调频式电容检测电路	位移、压力、密度、温湿度测量 (1) 检测材料的介电常数、导电性等 (2) 测量煤粉在管道中的浓度或分布 (3) 微位移传感器、空间惯性传感器的研制
交流式电容检测电路	(4) 高精度导航系统、惯性导航和飞行姿态控制等方面 (1) ECT 系统 (2) 电容层析成像系统
充放电式电容检测电路	(1) 核磁共振成像(MRI)设备 (2) 电子测量中调整信号的幅度和相位 (3) 金属材料的快速加热和熔炼等加工过程
谐振式电容检测电路	

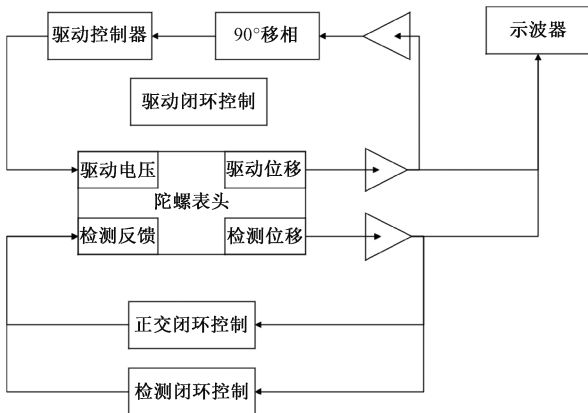


图 18 环形陀螺仪外围测试电路

Fig. 18 Peripheral test circuit of ring gyroscope

软硬件两方面,包括阵列式电极传感器、电容至电压的转换电路、输入/输出控制模块、模数转换检测模块、芯片间的交互程序模块等。其中,硬件方面基于交流激励式微电容检测电路扩展而成,检测精度可达 $0.04 \text{ fF}^{[60]}$ 。

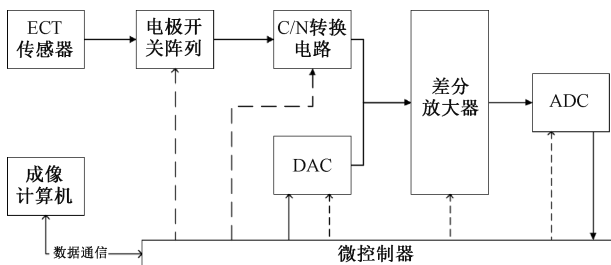


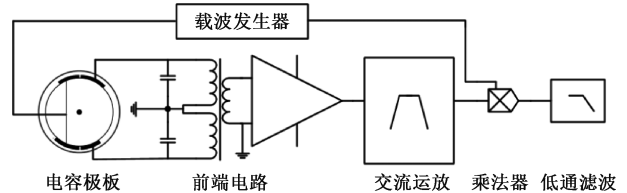
图 19 ECT 数据采集系统框图

Fig. 19 Block diagram of ECT data acquisition system

3) 重力梯度仪

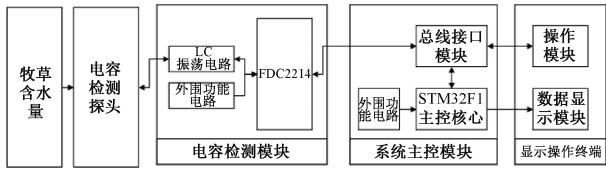
变压器桥式电路组合了正弦载波发生器、变压器、前

置电荷放大器、交流带通滤波器、开关调制解调器以及有源低通滤波器等多元化的电路单元,构建空间惯性传感器。其分辨率在 0.1 Hz 处已达 $1.6 \times 10^{-7} \text{ pF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。通过捕捉电容的变化,传感器能够精确地反映出位移的变化,并据此推导出加速度的变化,为精密测量和控制提供了坚实的基础^[61-63]。该电容-位移传感电路可与敏感探头、控制器等组合设计惯性传感器,用于空间引力波探测^[64];也可基于此原理搭建重力梯度仪,用于重力梯度测量、检验质量悬浮姿态的监测等^[65],重力梯度仪中共面电容传感器结构框架如图 20 所示。

图 20 共面电容位移传感整体框架^[65]Fig. 20 Integral frame of coplanar capacitance displacement sensing^[65]

4) 牧草水分检测

利用牧草中水分含量差异导致的介电特性变化,以及相对介电常数与电容测量值之间的关联,可以通过电容感应技术,将压力、位移、液位高度等物理参数转换为电容量。如图 21,可采用集成电容传感芯片,结合调频式电容测量方法,形成电容信号转换模块的核心组件,最终建立牧草含水率与电容值、温度之间的数学模型,计算牧草含水率。该整体装置能够在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,精确测量牧草含水率在 $10\% \sim 30\%$ 之间的变化,其线性相关性指标 R^2 达到 0.9841 ,且检测误差控制在 $\pm 2.67\%$ ^[66]。

图 21 牧草水分检测装置系统框架^[66]Fig. 21 System framework of forage moisture detection device^[66]

5 结 论

电容传感器的性能在很大程度上受检测电路性能的影响,因此,提升检测电路的性能对于优化电容传感器的整体表现至关重要。本文详细归纳了当前电容检测电路的技术手段及其基本原理,阐述了在电容传感器中检测电路的具体构成与多样的检测方式,同时介绍了其广泛应用的领域。目前,微弱电容检测电路在应对外界环境干扰、电路设计复杂度与调试难度、实时性与分辨率的兼顾、非线性误差以及仪器个体差异等方面存在一定的局限性。先进的封装技术也为电路的小型化提供重要支持,集成多个功能模块也成为另一重要趋势,同时也需关注量子电容、纳米电容等新型工艺的应用。未来,电容检测电路将变得更加微型化、集成化、智能化、多功能化、绿色化,为各领域提供更优质的服务。

参考文献

- [1] 刘铭洋,焦继业,吕显青. 基于 FPGA 的高分辨率电容检测系统设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(7): 72-77.
LIU M Y, JIAO J Y, LYU Y Q. Design of high resolution capacitance detection system based on FPGA [J]. *Electronic Design Engineering*, 2024, 32(7): 72-77.
- [2] 高青松,郭朝帽,陶院,等. MEMS 电容薄膜真空计微电容检测系统的设计[J]. 真空与低温, 2023(12): 1-8.
GAO Q S, GUO CH M, TAO Y, et al. Design of micro capacitance measurement system for MEMS capacitance diaphragm gauges [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2023(12): 1-8.
- [3] 张洪朋,郑文博,李伟,等. 交叉电容式传感器研究进展综述[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 117-124.
ZHANG H P, ZHENG W B, LI W, et al. Review of progress in research cross capacitive sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(7): 117-124.
- [4] 曾天禹,徐航,黄显. 呼呼气传感器进展、挑战和未来[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 65-81.
ZENG T Y, XU H, HUANG X. Development, challenges and future of the breath sensor[J]. *Chinese*

- [5] 王秋. MEMS 行星微震仪研制及测试[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
WANG Q. Development and test of MEMS planetary seismometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [6] 闫世源. 现代传感器中的微电容检测技术[J]. 电子制作, 2018(19): 57-60.
YAN SH Y. Micro capacitance detection technology in modern sensors [J]. *Practical Electronics*, 2018(19): 57-60.
- [7] 熊丽霞. 微弱电容传感信号读取电路技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
XIONG L X. Research of weak capacitance sensing signal readout circuit technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [8] 潘宇翔. 传感器差分电容检测电路的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
PAN Y X. A readout circuit for differential capacitive sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [9] MIDDLEMISS R P, SAMARELLI A, PAUL D J, et al. Measurement of the Earth tides with a MEMS gravimeter[J]. *Nature*, 2016, 531(7596): 614.
- [10] FURUBAYASHI Y, OSHIMA T, YAMAWAKI T, et al. A 22 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 17 mW capacitive MEMS accelerometer with electrically separated mass structure and digital noise-reduction techniques [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(9): 2539-2552.
- [11] 秦娟,王将宇,李琨,等. 基于非线性拟合的电容传感器测量[J]. 实验室科学, 2022, 25(1): 51-54, 57.
QIN J, WANG J Y, LI K, et al. Measurement of capacitance sensor based on nonlinear fitting [J]. *Laboratory Science*, 2022, 25(1): 51-54, 57.
- [12] 朱胜. 高精度电容位移传感器敏感探头电容提取及注入优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
ZHU SH. Research on capacitances extraction and injection optimization of sensitive probe in high-precision capacitive displacement sensors [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [13] 刘鑫,汪龙祺,于涛,等. 变压器参数对电容式位移传感器影响的研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(5): 49-52.

- LIU X, WANG L Q, YU T, et al. Study on influence of transformer parameters on capacitive displacement sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(5):49-52.
- [14] 都捷豪. 推挽式 MEMS 谐振加速度计测控电路技术研究[D]. 太原:中北大学, 2022.
- DU J H. Research on measurement and control circuit technology of MEMS push-pull type resonant accelerometer [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [15] 周文祥. 单极式高频响电容位移传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHOU W X. Research on key technology of unipolar high frequency response capacitive displacement sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [16] TOMÁ P, JAROMÍR K, JÍÍ T, et al. Development of capacitive sensors for measuring vibrations and small displacements of a high-speed rotating machines for use in active vibration control systems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 365: 114902.
- [17] 陈莉. 基于充放电原理的小电容测量电路的设计[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(16):147-150, 155.
- CHEN L. Design of small capacitance measurement circuit based on charge discharge principle [J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26 (16): 147-150, 155.
- [18] 平文. MEMS 硅谐振式压力传感器设计[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- PING W. Design of MEMS silicon resonant pressure sensor[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2017.
- [19] 马宗方, 畅璇, 张兴成, 等. 基于硅微陀螺的环形二极管电容检测技术研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(8): 7-12.
- MA Z F, CHANG X, ZHANG X CH, et al. Research on capacitor detection technology of ring diode based on silicon micro gyroscope[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(8):7-12.
- [20] 胡谟, 董景新, 蔡辛, 等. 二极管电容检测用于微加速度计的误差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008(11):1908-1910.
- HU H, DONG J X, CAI X, et al. Error analysis of capacitance detector diodes in micro machined accelerometers [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008(11):1908-1910.
- [21] 周晓桐, 张嵘. 环形二极管电容检测电路特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(6):653-658.
- ZHOU X T, ZHANG R. Ring-diode capacitance detection circuit characteristics[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2021, 61 (6): 653-658.
- [22] 林瑞. 基于环形二极管的 MEMS 电容式加速度计读出电路研究[D]. 天津:天津理工大学, 2022.
- LIN R. Research on readout circuit of MEMS capacitive accelerometer based on ring diode [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [23] 康恒, 李勇滔, 李超波, 等. 一种电容薄膜真空计检测电路的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(3):45-48.
- KANG H, LI Y T, LI CH B, et al. Design of capacitance film vacuum gauge detection circuit [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(3):45-48.
- [24] 陈泓波, 黄向东, 刘立丰, 等. 高精度调频式电容位移传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2011(12):10-11, 26.
- CHEN H B, HUANG X D, LIU L F, et al. High-precision FM displacement capacitance sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011 (12): 10-11, 26.
- [25] 龙成, 段发阶, 欧阳涛. 超外差调频接收技术在叶尖间隙测量中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(3): 108-110.
- LONG CH, DUAN F J, OUYANG T. Application of superheterodyne FM reception in measurement of blade tip clearance [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(3):108-110.
- [26] ZHU D, MO J, XU Z Y F. A new capacitance-to-frequency converter for on-chip capacitance measurement and calibration in CMOS technology[J]. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2016, 32(3):393-397.
- [27] NIKOLOV G T, RUSKOVA I N, GIEVA E E, et al. System for multi-frequency capacitance-voltage characterization presentation [J]. *ArXiv preprint arXiv:1109.8124373*, 2017.
- [28] 张振华. 用于激光切割的高精度电容调高系统研究和设计[D]. 济南:山东大学, 2020.
- ZHANG ZH H. Research and design of high precision capacitor heightening system for laser cutting [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [29] TYAGI T, SUMATHI P. Frequency estimation techniques in capacitance-to-frequency conversion measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*,

- 2020, 91(1):015005.
- [30] 冯佳,李佩玥,徐立松,等.基于反馈的交流激励式电容测量电路设计[J].国外电子测量技术,2014,33(11):38-42.
FENG J, LI P Y, XU L S, et al. Design of AC excitation capacitive measurement circuit based on feedback [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(11):38-42.
- [31] 刘诗源.电容层析成像系统关键技术研究与设计[D].南昌:华东交通大学,2017.
LIU SH Y. Research and design of key technology for capacitance tomography system[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.
- [32] 谢琦,古玉雪,余乐咏.液位传感器信号模拟方案的设计及研究[J].电测与仪表,2022,59(4):107-111.
XIE Q, GU Y X, YU L Y. Design and research of simulation scheme for liquid level transducer signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4):107-111.
- [33] 杨升琦.基于球面电容传感器的二维角运动信号检测技术研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2022.
YANG SH Q. The technology for detecting two-degree-of-freedom angular displacement of spherical pair based on a spherical capacitive sensor [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [34] 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.
ZHANG X F, WU D W. Micro capacitance detection circuit based on voltage-feedback operational amplifier[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(10):112-116.
- [35] 龙航.电容层析成像传感器输出特性优化研究及其系统设计[D].西安:西安理工大学,2021.
LONG H. Research on optimizing output characteristics of electrical capacitance tomography sensor and its system design [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [36] 冯佳.极微小电容的检测技术研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
FENG J. Research on detecting technology of tiny capacitance [D]. Changchun: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics), 2014.
- [37] SMITH F D, LAKEY E H, MORGAN H. The admiralty cathode ray oscillograph engine indicator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1940, 143(1):39-47.
- [38] MANTENUTO P, DE M A, FERRI G. Novel modified De-Sauty autobalancing bridge-based analog interfaces for wide-range capacitive sensor applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5):1664-1672.
- [39] 邢本凤.高精度微弱电容检测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
XING B F. Study of high precision weak capacitance measurement techniques [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [40] 付连壮,刘曰涛,韩振,等.用于纳米压电定位平台的电容传感器设计[J].传感器与微系统,2024,43(4):100-103.
FU L ZH, LIU Y T, HAN ZH, et al. Design of capacitive sensor for nano piezoelectric positioning platform [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(4):100-103.
- [41] MANCE D. Development of electronic system for sensing and actuation of test mass of the inertial sensor LISA [D]. Split: University of Split, 2012.
- [42] 高诗梦,王鹤,李云鹏.静电悬浮加速度计电容检测电路变压器桥路设计[J].真空与低温,2017,23(5):297-300.
GAO SH M, WANG Y, LI Y P. The design of transformer bridge on capacitance detection circuit of electrostatic levitation accelerometer [J]. Vacuum & Cryogenics, 2017, 23(5):297-300.
- [43] XIE Y, FAN J, ZHAO C, et al. Modeling and analysis of the noise performance of the capacitive sensing circuit with a differential transformer [J]. Micromachines, 2019, 10(5):325-325.
- [44] 贺晓霞,郑峥嵘,韩丰田,等.地面静电加速度计的位移检测电路设计[J].导航与控制,2020,19(3):40-50,77.
HE X X, ZHENG ZH R, HAN F T, et al. Design of displacement detection circuit for electrostatically suspended accelerometer in full earth gravity [J]. Navigation and Control, 2020, 19(3):40-50,77.
- [45] 顾英.石英挠性加速度计伺服电路[J].飞航导弹,

- 1985(S1):7-14.
- GU Y. Quartz flexible accelerometer servo circuit[J]. Winged Missiles Journal,1985(S1):7-14.
- [46] 刘孟良. 全差分电容式传感的 CMOS 读出电路设计与实现[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.
- LIU M L. Fully differential capacitive sensor readout circuit design and realization of CMOS[D]. Xiangtan: Xiangtan University,2015.
- [47] 王磊. 充放电式电容位移传感电路噪声分析与抑制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- WANG L. Research on noise analysis and suppression of the charging-discharging capacitance position sensor circuit[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2019.
- [48] 魏业玖. MEMS 数字陀螺中开关电容检测电路的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- WEI Y J. Design of switch capacitor detection circuit for MEMS digital gyroscope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2015.
- [49] 黄昱. 差分电容检测中分布电容的影响分析与电路优化[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
- HUANG Y. Analysis and circuit optimization of distributed capacitance in differential capacitance measurements[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2018.
- [50] 黄苏平,范雪,吴东. 基于电荷放大原理的电容检测电路设计[J]. 绵阳师范学院学报,2022,41(11):27-32.
- HUANG S P, FAN X, WU D. Design of capacitance detection circuit based on charge amplification principle[J]. Journal of Mianyang Teachers' College,2022,41(11):27-32.
- [51] 张伟玉. 谐振式传感器输出信号的高分辨率测量技术研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- ZHANG W Y. A research on high resolution measurement technologies of resonant sensor output signals[D]. Tianjin: Tianjin University,2013.
- [52] HU M, BAI Y ZH, ZHOU Z B, et al. Resonant frequency detection and adjustment method for a capacitive transducer with differential transformer bridge[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5):589-598.
- [53] 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(S1):19-22.
- ZHAO F, PEI J, XU P, et al. Calibration of the resonant frequency of a resonator system for complex permittivity measurement [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement,2019,39(S1):19-22.
- [54] 鲁涛. MEMS 谐振式压力传感器驱动与检测电路的研究与设计[D]. 云南:云南师范大学,2024.
- LU T. Research and design of driving and detection circuits for MEMS resonant pressure sensor [D]. Yunnan: Yunnan Normal University,2024.
- [55] 韩春杰,姜继帅,袁建,等. 基于 Pcap01 模块电路的 A4 纸张页数测量系统[J]. 国外电子测量技术,2022,41(1):76-80.
- HAN CH J, JIANG J SH, YUAN J, et al. A4 paper page number measurement system based on Pcap01 module circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2022,41(1):76-80.
- [56] 霍典,张洪朋,史皓天,等. 一种液压油多污染物微检测传感器设计及研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(3):50-58.
- HUO D, ZHANG H P, SHI H T, et al. Design and research of a micro-sensor for multi-pollutant detection in hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2021,42(3):50-58.
- [57] 史皓天,张洪朋,王文琪,等. 一种液压油磨粒检测新方法研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):44-51.
- SHI H T, ZHANG H P, WANG W Q, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2019,40(9):44-51.
- [58] 侯亚宾,卜雄洙,孙斌. 微小电容检测系统的设计及应用[J]. 国外电子测量技术,2015,34(12):87-90.
- HOU Y B, BU X ZH, SUN B. Design and application of micro capacitance detection system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2015,34(12):87-90.
- [59] 刘宇鹏. 硅基环形波动陀螺闭环检测系统设计研究[D]. 太原:中北大学,2023.
- LIU Y P. Design of closed-loop detection system for silicon-based ring gyroscope [D]. Taiyuan: North University of China,2023.
- [60] 张政. 基于电容层析成像技术的多相流非侵入式检测系统开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.
- ZHANG ZH. Development of non-invasive multiphase flow measurement system based on electrical capacitance tomography [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2022.

- [61] 李洪银,刘雁冲,王铖锐,等.天琴惯性传感器初步设计思考与进展[J].中山大学学报(自然科学版),2021,60(Z1):186-193.
LI H Y, LIU Y CH, WANG CH R, et al. Preliminary design consideration and development of Tianqin inertial sensor [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60 (Z1): 186-193.
- [62] 陈光锋,霍红庆,王佐磊,等.静电悬浮加速度计地面高压悬浮原理与应用[J].中国空间科学技术,2015,35(5):56-63.
CHEN G F, HUO H Q, WANG Z L, et al. Ground high voltage suspension theory and applications for electrostatic accelerometer[J]. Chinese Space Science and Technology, 2015, 35(5): 56-63.
- [63] 祝翔宇.高分辨率充放电式差分电容传感器研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
ZHU X Y. High resolution charging/discharging differential capacitance sensor research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [64] 肖春雨.天琴引力波探测器无拖曳控制建模与设计研究[D].武汉:华中科技大学,2023.
XIAO CH Y. Research on modeling and design of drag-free control for the Tianqin gravitational wave detector[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [65] 李晨阳.用于低温超导重力梯度仪中的共面电容传感器研制[D].武汉:华中科技大学,2023.
LI CH Y. Development of coplanar capacitive sensors for cryogenic superconducting gravity gradiometers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [66] 蔡金易.基于电容边缘效应的牧草水分检测方法研究[D].北京:北京林业大学,2022.
CAI J Y. Study on the detection method of herbage moisture based on capacitive edge effect[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

作者简介

刁 媛, 硕士研究生, 主要研究方向为电容检测电路。

E-mail: 220220941550@lzu. edu. cn

贾 远 东, 博士研究生, 主要研究方向为空间引力波探测中的电荷管理系统。

E-mail: jiayd20@lzu. edu. cn

金 新 人, 硕士研究生, 主要研究方向为空间惯性传感器电荷控制系统的 ZYNQ 实现。

E-mail: jxr0103@outlook. com

李 红 信, 硕士生导师, 主要研究方向为分布参数系统的分析、建模与控制。

E-mail: hongxinli@lzu. edu. cn

李 宗 峰(通信作者), 硕士生导师, 主要研究方向为微重力主动隔振技术。

E-mail: lzfeng@csu. ac. cn