

# 直流偏置对电容式微机械超声换能器性能影响的研究

索文字<sup>1</sup>, 张文栋<sup>1</sup>, 任勇峰<sup>1</sup>, 吴敏<sup>2</sup>, 吴子君<sup>2</sup>, 何常德<sup>1</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 国网山西省电力公司朔州供电公司, 山西 朔州 036000 )

**摘要:** 直流偏置电压是电容式微机械超声换能器的一个重要参数。以实验室设计制造的电容式微机械超声换能器为基础, 研究不同的直流偏置电压对电容式微机械超声换能器的振动位移、振动速度、发射灵敏度、发射声压、接收灵敏度和中心频率的影响。结果表明: 直流偏置电压值对器件收发性能有很大的影响, 应根据使用目的不同选择合适的直流偏置电压。

**关键词:** 电容式微机械超声换能器; 直流偏置; 发射特性; 接收特性

**中图分类号:** TB552    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2022)05-0207-04

## Research on Influence of DC Bias on Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer

SUO Wenyu<sup>1</sup>, ZHANG Wendong<sup>1</sup>, REN Yongfeng<sup>1</sup>, WU Min<sup>2</sup>, WU Zijun<sup>2</sup>, HE Changde<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. State Grid Shanxi Province Electric Power Company Shuozhou

Power Supply Company, Shuozhou 036000, China)

**Abstract:** DC bias voltage is an important parameter of capacitive micromachined ultrasonic transducer. Based on the capacitive micromachined ultrasonic transducer designed and manufactured in the laboratory, this paper studies the effects of different DC bias voltages over the vibration displacement, vibration velocity, emission sensitivity, emission sound pressure, receiving sensitivity and the center frequency of the transducer. The conclusion is that it is necessary to select appropriate DC bias voltage according to the purpose of use since DC bias voltage value has big influence on the transceiver performance of the device.

**Keywords:** CMUT; DC bias; transmission characteristics; receiving characteristics

## 0 引言

随着微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 技术的发展, 电容式微机械超声换能器 (capacitive micromachined ultrasonic transducer, CMUT) 向着阵列化和小型化发展。与传统的压电超声换能器相比, CMUT 具有显著的优势, 其体积小, 易于大规模集成, 带宽高, 成本低<sup>[1-3]</sup>, 是未来超声换能器发展的趋势。在无损检测<sup>[4]</sup>和医疗成像<sup>[5]</sup>中, CMUT 器件都是关键组件。因此, CMUT 器件的性能直接关系到发射和接收的超声波信号的质量。

CMUT 与传统的压电换能器的不同之处在于, 当 CMUT 发送和接收超声波时除了施加交流激励电压还必须施加直流偏置电压, 而且在不同的直流偏置电压下 CMUT 的收发性能不同。因此, 本文研究分析了不同的直流偏置电压下 CMUT 器件的振动薄膜速度、位移、发送和接收超声波的特性, 以获得良好的应用效果。

## 1 电容式微机械超声换能器

### 1.1 CMUT 器件的结构

CMUT 阵列的每个阵元由许多敏感单元组成, 敏感单

元通常由金属上电极、隔离层、振动薄膜、边缘支撑、空腔、绝缘层和下电极组成<sup>[6]</sup>。图 1 给出了 CMUT 敏感单元的结构尺寸, CMUT 器件在共聚焦显微镜图像如图 2(a) 所示。封装使用低衰减率和防水聚氨酯橡胶和低黏度的硅油, 具有防水性和良好的透声性, 封装后 CMUT 如图 2(b) 所示。

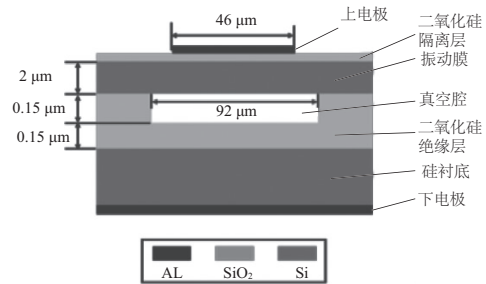


图 1 CMUT 单元结构

### 1.2 CMUT 的工作原理

CMUT 通过膜的振动发射和接收超声波, 当在敏感单元的上下电极施加直流偏置电压时, 两个非常接近但彼此绝缘的导电表面迅速产生电荷, 电容被充电, 电荷之间

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01010500); 国网山西省电力公司科技项目(SGSXSZ00FCJS2000147)

第一作者简介: 索文字(1997—), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为新型 MEMS 超声换能器阵列设计及成像系统。

的相互作用力为静电力。

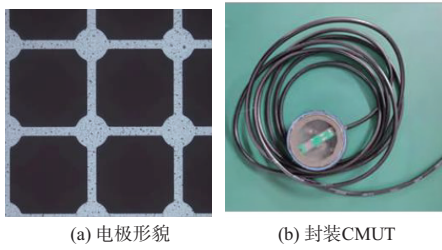


图2 CMUT 器件

当 CMUT 发射超声波时,在上、下电极施加直流偏置后,静电力导致振动薄膜向下弯曲,直到静电力与弹性恢复力达到平衡状态,此时再施加正弦波脉冲的交流激励,薄膜振动发出超声波。

当接收超声波时,CMUT 上的电压仅为直流偏置电压,超声波作用在振动薄膜上时,薄膜的平衡状态被破坏,薄膜振动改变敏感单元的电容值,从而产生电流信号,使用跨阻放大电路转化为电压信号。

## 2 不同直流偏置电压下 CMUT 振动薄膜

### 2.1 仿真模型分析

首先,使用软件 COMSOL 对 CMUT 敏感单元进行建模,根据 CMUT 器件各部分的尺寸建立仿真模型,如图 3 所示。实际使用直流偏置电压一般不超过 40 V,因此,研究 CMUT 的直流偏置电压为 0~35 V。

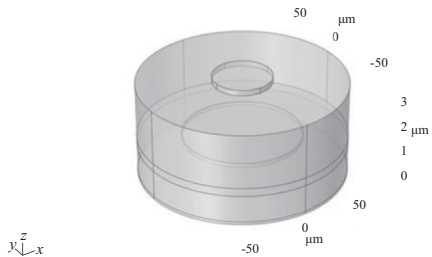


图3 CMUT 仿真模型

在上、下电极施加变化范围为 0~35 V 的直流偏置电压和 3 MHz 的正弦交流激励电压,直流偏置变化步长为 5 V。不同直流偏置电压下的位移曲线如图 4 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。当 CMUT 敏感单元随施加直流增加时,薄膜产生较大的位移变化。随着直流偏置电压的增加,薄膜的位移越来越大。

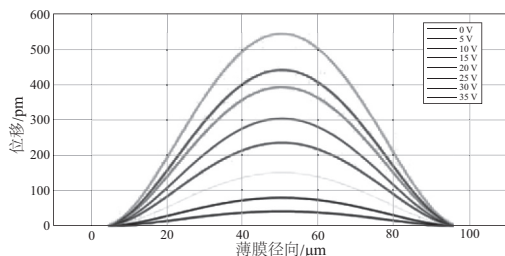


图4 仿真不同直流偏置下薄膜位移

### 2.2 测试分析

本文使用激光多普勒测振仪 MSA500 (MSA-500, Polytec) 对 CMUT 测试位移和速度的变化。交流激励为 3 MHz,峰值为 20 V 的正弦波,直流偏置电压在 0~35 V 内变化,变化步长是 5 V。薄膜振动到最高和最低位置时的位移和速度如图 5 所示。

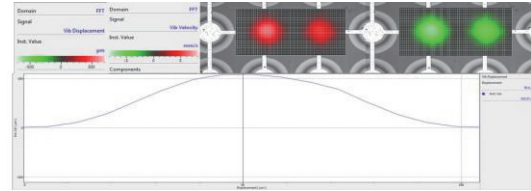


图5 振动位移和速度测试系统

不同直流偏置电压下薄膜的最大位移如图 6 所示,随着直流偏置电压的增加,薄膜的最大振动位移增大。当直流偏置电压为 0、5、10、15、20、25、30 和 35 V 时,薄膜中心最大位移分别为 17.55、84.27、155.62、183.24、307.42、338.31、362.04 和 543.57 μm。这与仿真结果基本一致。系统测试不同直流偏置电压下薄膜中心点的最大振动速度如图 7 所示,薄膜中心的最大振动速度也随着直流偏置电压的增加而增加。当直流偏置电压为 0、5、10、15、20、25、30、35 V 时,薄膜中心的最大速度分别为 0.225、1.016、1.956、2.316、3.825、4.228、4.423、6.863 mm/s。

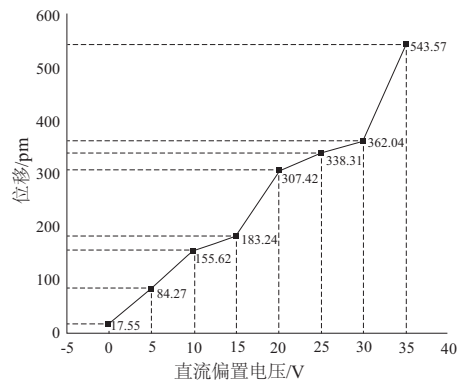


图6 不同直流偏置电压下 CMUT 薄膜的最大振动位移

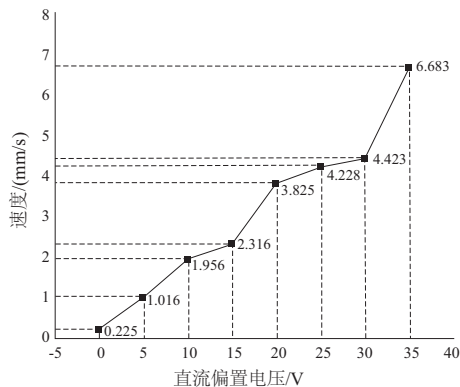


图7 不同直流偏置电压下 CMUT 薄膜的最大振动速度

### 3 不同直流偏置电压下 CMUT 中心频率的研究

首先搭建 CMUT 中心频率测试系统,如图 8 所示。在实验中,选择了两个相同的 CMUT 器件,距离为 10 cm,使用一个窄脉冲驱动和一个 CMUT 发射超声波,另一个 CMUT 用于接收超声波。窄脉冲幅值为 15 V,持续时间为 117 ns。两个 CMUT 器件的直流偏置电压从 0 V 变化到 35 V,变化幅度为 5 V,示波器采集接收信号。

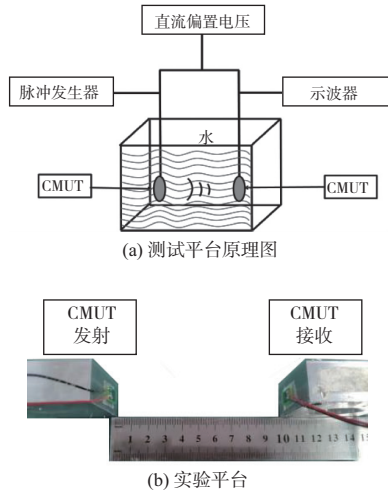


图 8 不同直流偏置电压下 CMUT 中心频率水下测试平台

不同直流偏置电压下接收信号的频率如图 9 所示,当直流偏置电压分别为 0、5、10、15、20 和 25 V 时,CMUT 器件的中心频率分别为 4.880、4.855、4.793、4.725、4.638、4.510 MHz。随着直流偏置电压的增加,CMUT 器件的中心频率变小,且趋势愈加明显,主要是由于振动薄膜形变程度不同导致振动薄膜的固有频率的变化。

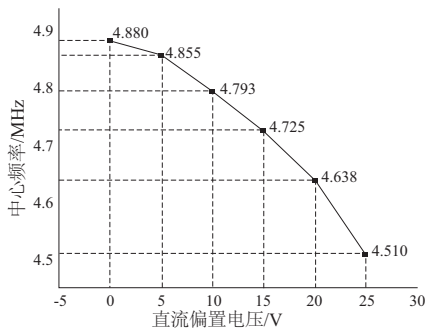


图 9 不同直流偏置电压下 CMUT 的中心频率

### 4 不同直流偏置下 CMUT 发射性能分析

水下测试系统如图 10 所示,CMUT 发射超声波,水听器接收,相距 10 cm。交流信号由信号发生器产生,通过功率放大器放大,直流偏置电压由功率放大器提供。针状水听器接收到的信号由示波器采集。

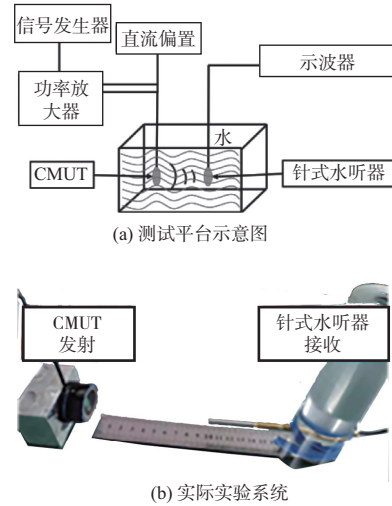


图 10 不同直流偏置电压的 CMUT 发射特性水下测试平台

交流激励频率为 3 MHz,峰峰值为 20 V,3 个周期的正弦波,CMUT 发射时改变直流偏置,水听器接收到的信号如图 11 所示。针式水听器的灵敏度为 1 088 mV/MPa,根据针式水听器的灵敏度计算出 CMUT 发射的声压和灵敏度值。

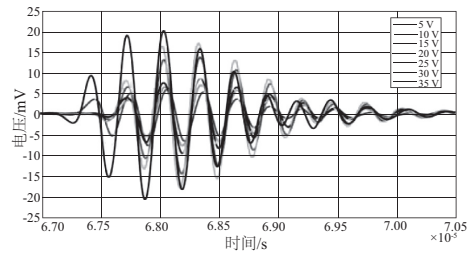


图 11 针式水听器接收的电压信号

由图 11 可以看出,当直流偏置电压为 5、10、15、20、25、30、35 V 时,针式水听器接收到的电压峰峰值分别为 12、14、17、22、27、34、41 mV。随着直流偏置电压的增大,发射的超声信号的幅值增大。

使用针式水听器接收到的电压信号和灵敏度计算得到 10 cm 处的声压值如图 12 所示,随着直流偏置电压的增大,CMUT 发射的声压也随之增大。当直流偏置为 5、10、15、20、25、30 和 35 V 时,10 cm 处声压值分别为 11.02、12.86、15.63、20.22、24.81、31.25 和 37.68 kPa,直流偏置电压 > 15 V 时,声压增大趋势越发明显。

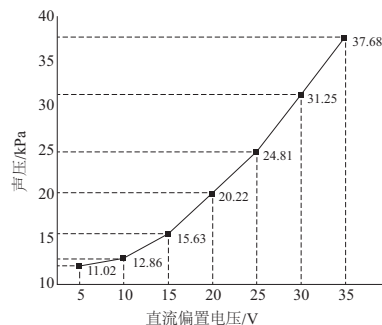


图 12 不同直流偏置电压下 CMUT 发射的声压值

根据 CMUT 的驱动电压和发射声压得到 CMUT 器件的发射灵敏度如图 13 所示。由图可知,当直流偏置电压为 5、10、15、20、25、30、35 V 时,CMUT 的灵敏度分别为 0.551、0.643、0.782、1.011、1.241、1.563、1.884 kPa/V; CMUT 的灵敏度随着直流偏置电压的增加而增加。

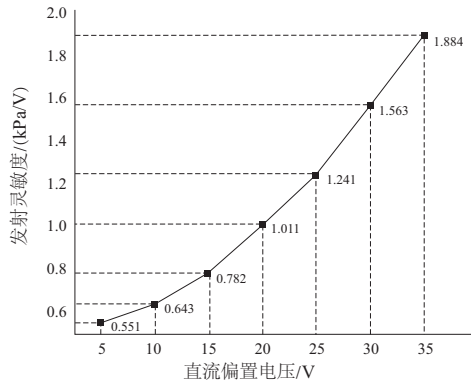
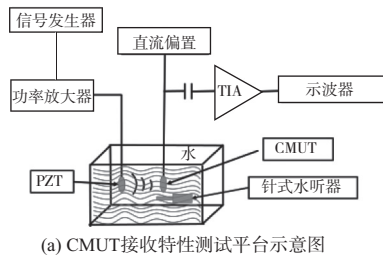


图 13 不同直流偏置电压下 CMUT 的发射灵敏度

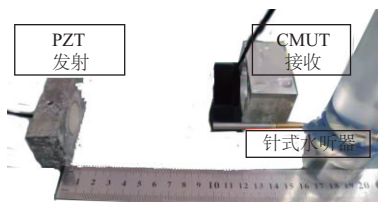
当直流偏置电压<15 V 时,对 CMUT 发射的超声信号、声压和发射灵敏度的影响较小。当直流偏置电压>15 V 时,CMUT 发射的超声信号幅值、声压和发射灵敏度变化较大,直流偏置越接近崩溃电压 CMUT 器件的发射性能越强。

### 5 不同直流偏置下 CMUT 接收特性分析

实验测试平台如图 14 所示,压电换能器发射,CMUT 和水听器在同一位置接收,距离为 10 cm,压电换能器的激励频率为 3 MHz、3 个周期、幅值为 20 V 的正弦波。



(a) CMUT接收特性测试平台示意图



(b) 实际实验系统

图 14 不同直流偏置电压下 CMUT 接收特性测试平台

压电换能器在交流激励驱动下发射超声波,用示波器采集不同直流偏置电压下的 CMUT 接收信号,然后用针式

水听器代替 CMUT 在相同位置接收超声信号,根据针式水听器的接收电压值和灵敏度计算接收位置的声压值。

CMUT 器件在不同的直流偏置电压下的接收信号如图 15 所示,当直流偏置电压为 5、10、15、20、25、30 和 35 V 时,接收信号的峰峰值分别为 48.44、345.50、637.70、1 299.80、2 044.80 和 3 172.00 mV。接收信号的电压幅度随直流偏置电压的增加而增加。

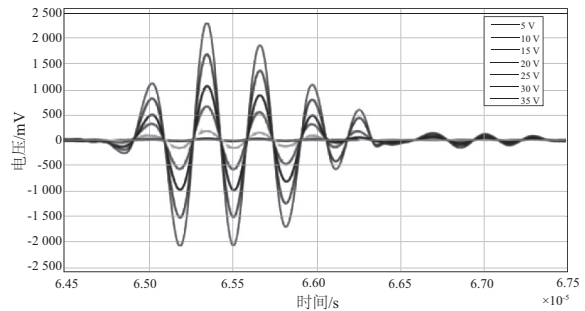


图 15 不同直流偏置电压下 CMUT 接收的电压信号

针式水听器接收到的电压值为 144 mV,计算得到的声压为 132.35 kPa,根据声压值计算的 CMUT 的接收灵敏度如图 16 所示。随着直流偏置电压的增加,CMUT 的接收灵敏度变得越来越大。当直流偏置电压为 0、5、10、15、20、25、30、35 V 时,CMUT 器件的接收灵敏度分别为 0.366、2.611、4.818、9.821、15.451、23.971、32.796 mV/kPa。

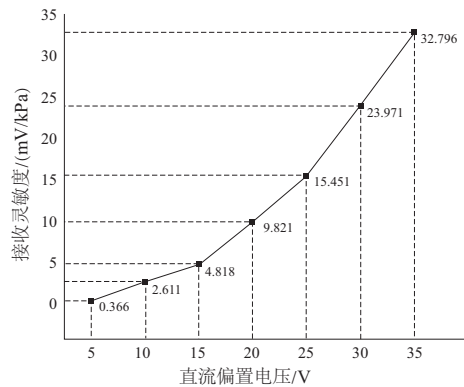


图 16 不同直流偏置电压下 CMUT 的接收灵敏度

综上所述,当直流偏置电压<15 V 时,CMUT 的接收电压值和接收灵敏度只会受到较小的影响。当直流偏置电压>15 V 时,CMUT 的接收电压值范围增大,接收灵敏度增大。

### 6 结语

通过仿真和实验研究得出以下结论,在恒定交流激励的条件下:

- 1)随着 CMUT 直流偏置电压的增加,振动薄膜的最大位移幅度和最大振动速度也增加。
- 2)CMUT 的直流偏置电压增大,CMUT 的中心频率趋于变小。

(下转第 227 页)



恒功率运行仿真过程进行说明与分析。

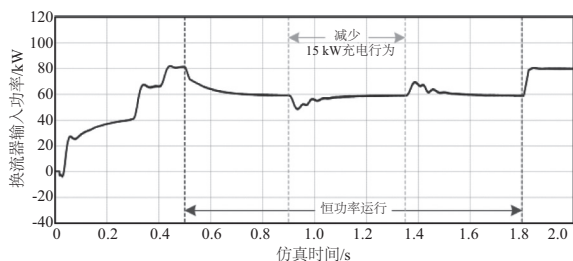


图6 换流器输入功率波形图

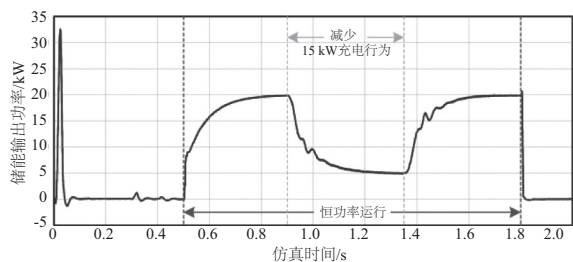


图7 储能输出功率波形图

1)忽略启动过程电压波动情况,0.30 s和0.40 s时相继投入25 kW和15 kW负荷,系统达到120 kW额定功率值。根据本文所述控制架构,换流站承担维持直流母线电压的主要任务,使负荷波动动态过程结束后,直流母线电压维持在750 V额定值。

2)0.50 s时触发恒功率运行模式,恒功率值设定为60 kW,由于光伏发电功率维持在40 kW,因此无法完全补足用电功率差额,因此系统按照表2中的第二种运行模式,由储能装置对剩余的功率差额进行补充。

3)0.90 s~1.35 s,为减小储能装置补额的压力,根据表3减少电动汽车充电行为,退出15 kW负荷。

4)1.35 s~1.80 s,充电行为恢复,配电系统返回2)运行状态。

5)1.80 s时,退出恒功率运行状态,此时超级电容储能单元恢复至零状态,用电功率为120 kW,原先由其承担的功率差额转移至并网单元换流器承担,换流器输入功率恢复至80 kW,直流母线电压经历短暂的动态过程后恢复

至稳态指令值750 V。

在0.50 s~1.80 s的恒功率运行时段,通过系统内光伏、储能及电动汽车之间的协调配合,将市电取电功率由120 kW降低至60 kW,节约传统电能消耗50%,在电动汽车充电行为可控的条件下,还可降低储能配置容量,进一步优化经济成本。以上仿真结果验证了基于光、储、电动汽车协调的直流商务楼宇恒功率柔性运行模式的可行性。

## 4 结语

本文针对“双碳”目标下商务楼宇的“光储直柔”恒功率运行模式展开研究,相关结论如下:

1)基于未来楼宇源荷结构的变化特点,商务楼宇是建筑领域中先行推广低压直流配电系统的理想场景;

2)商务楼宇“光储直柔”恒功率运行模式以充分发挥分布式光伏发电能力为基础,通过对储能装置及可控负荷的协调控制,降低区域内传统用电能耗及购电成本,是实现建筑节能减排、践行“双碳”目标的有效途径;

3)合适的恒功率取值可有效缩减储能安装容量,降低建设投资成本,提升清洁能源消纳能力。

### 参考文献:

- [1] 屈博,刘畅,李德智,等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):1-3,9.
- [2] DB11/891—2020 居住建筑节能设计标准[S].
- [3] 梁永亮,吴跃斌,马钊,等. 新一代低压直流供电系统在“新基建”中的应用技术分析及发展展望[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):13-24,394.
- [4] BOROYEVICH D, CVETKOVICH I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov, Romania; IEEE,2010:1369-1380.
- [5] 马钊,焦在滨,李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术,2017,41(10):3348-3357.
- [6] 王旭婷,童亦斌,赵宇明,等. 民用建筑低压直流配电系统接地方式研究[J]. 供用电,2019,36(9):52-58.
- [7] 陈红坤,何桂雄,石晶,等. 楼宇交直流混合供电模式下直流电压等级的研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5840-5851.

收稿日期:2021-06-03

(上接第210页)

3)CMUT的发射声压和发射灵敏度随直流偏置电压的增加而增加。

4)CMUT的接收灵敏度和接收电压幅度随直流偏置电压的增加而增加。

因此,CMUT在不同的应用需求中调节适当的CMUT直流偏置电压,以获得合适的应用效果。

### 参考文献:

- [1] ORALKAN O, ERGUN A S, JOHNSON J A, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next-generation arrays for acoustic imaging? [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2002,49(11):1596-1610.
- [2] 张睿,潘理虎,陈立潮,等. 基于形态学串行运算的CMUT水

下扇形扫描探测[J]. 传感技术学报,2018,31(2):234-240.

[3] 张慧,郑冠儒,李志,等. 空气耦合电容式微超声换能器线阵设计与测试[J]. 传感技术学报,2018,31(5):803-808.

[4] 王波,高双胜,马明. 2024 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头缺陷超声无损检测[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):54-56.

[5] WANG M L, CHEN J K, CHENG X Y, et al. Design and test of a monolithic ultrasound-image-guided HIFU device using annular CMUT rings[C]//2008 IEEE Ultrasonics Symposium. Beijing, China; IEEE,2008:459-462.

[6] LADABAUM I, JIN X C, SOH H T, et al. Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,1998,45(3):678-690.

收稿日期:2022-05-11