

微型电场传感器在工频电场测量中的应用研究

全杰^① 雷煜卿^① 刘国华^{②③} 王鹤^{②③}
金学明^{②③} 杨鹏飞^{*④} 彭春荣^④

^①(中国电力科学研究院有限公司 北京 100192)

^②(北京智芯微电子科技有限公司电力芯片设计分析实验室 北京 100192)

^③(北京智芯微电子科技有限公司北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心 北京 100192)

^④(北京中科飞龙传感技术有限责任公司 北京 100083)

摘要: 该文基于高性能的MEMS电场敏感芯片研制出一种新型的工频电场测量系统。针对芯片调制被测电场后其输出信号的特征,采用正交相关检测原理提出一种可抑制背景干扰噪声的工频电场解调算法,设计出小型化、空间分辨力高的工频电场测量探头,并在基础上提出MEMS工频电场测量系统的系统级设计方案,成功实现了MEMS电场敏感芯片输出信号的无线采集、滤波、以及电场信号的高精度解调。高压输电线路下工频电场测量结果表明, MEMS工频电场测量系统与传统电场测量仪的测量结果具有良好的 consistency。

关键词: 电场传感器; 工频电场; 正交相关检测

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-3036-06

DOI: 10.11999/JEIT180217

Power-frequency Electric Field Measurement Using a Micromachined Electric Field Sensor

TONG Jie^① LEI Yuqing^① LIU Guohua^{②③} WANG He^{②③} JIN Xueming^{②③}
YANG Pengfei^④ PENG Chunrong^④

^①(China Electric Power Research Institute, Co., Ltd., Beijing 100192, China)

^②(State Grid Key Laboratory of Power Industrial Chip Design and Analysis Technology, Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

^③(Beijing Engineering Research Center of High-reliability IC with Power Industrial Grade, Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

^④(Beijing TFlying Transducer Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: A novel power frequency electric field measurement system based on high-performance MEMS electric field sensing chips is developed. Based on cross-correlation detection principle, a power frequency electric field demodulation algorithm of MEMS sensing chips that can inhibit background interference noise is proposed. And a small-scale, high-resolution electric field measuring probe is designed. Moreover, the system overall structure scheme is designed for implementation of high-accuracy demodulation electric field signals. The test result under power lines shows that the plotted curves of the developed MEMS system are consistent with Narda EFA-300.

Key words: Electric field sensor; Power-frequency electric field; Cross-correlation detection

收稿日期: 2018-03-07; 改回日期: 2018-08-14; 网络出版: 2018-08-23

*通信作者: 杨鹏飞 yang330650591@126.com

基金项目: 国家发展改革委物联网技术研发及产业化专项(发改办高技〔2012〕2766号); 国家电网公司总部科技项目(SGJSDK00ZPJS1600203)

Foundation Items: The Special Fund of National Development and Reform Commission for IoT R&D and Industrialization (NDRC High-Tec (2012) 2766), The Headquarter Science and Technology Fund of State Grid Corporation of China (SGJSDK00ZPJS1600203)

1 引言

电场探测技术在电力行业中不可或缺, 已经成为一种非常有效的科学研究和测量手段。精确地测量电力设备周围空间电场及变化, 对电力设备的设计制造和安全运行具有非常重要的意义。

经过多年的发展, 目前常用的电场测量传感器主要有电容式电场传感器^[1]、场磨式电场传感器^[2]以及光学式电场传感器等^[3]。电容式电场传感器如德国Narda公司EFA-300体积大, 空间分辨力低, 价格昂贵; 场磨式电场传感器主要用于直流电场测量; 光学式电场传感器则由于温度问题, 目前主要还处于研究阶段。

基于MEMS的电场传感技术是一种先进的电场测量手段, 国内外相继报道了多种MEMS电场敏感芯片^[4-13]。测试数据表明, MEMS电场敏感芯片的电流输出与被测电场之间存在良好的线性关系^[14-16]。与传统的工频电场传感器相比较, MEMS电场传感器具有体积小、空间分辨力高、功耗低、成本低、易批量生产等优点。然而, 由于MEMS电场传感器感应面积小(感应单元特征尺寸约1 mm), 感应信号微弱, 串扰噪声强, 信噪比低, 信号难以提取, 并且大多数主要侧重于静电场检测, 没有对交变电场检测进行深入研究。

为了实现MEMS电场敏感芯片应用于工频电场检测, 本文基于已研制的电场敏感芯片, 提出了一种可抑制背景噪声干扰的工频电场解调算法, 成功研制出了MEMS工频电场测量探头和系统样机, 并基于Labview可视化编程语言实现了工频电场信号的上位机解调。电场测试结果表明: 在10 kV典型输电线路下以及110 kV同塔多回输电线路复杂电场环境下, MEMS工频电场测量系统与Narda EFA-300的测试结果具有良好的一致性。

2 MEMS电场敏感芯片工作原理

MEMS电场传感器敏感芯片的感应原理如图1所示。为了提高感应效率, 敏感芯片的屏蔽电极和感应电极设计在同一结构层^[15], 屏蔽电极接地, 感应电极与检测电路相连接。在芯片正上方施加电场 E , 当屏蔽电极在感应电极(+)和感应电极(-)之间周期性水平左右振动时, 屏蔽电极调节感应电极周围的电场发生变化, 引起感应电极表面的感应电荷量发生周期性改变, 依据高斯定理, 产生交变感应电流 i_s , 可表示为

$$i_s = \epsilon_0 \frac{dEA}{dt} \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; E 为感应电极周围的电

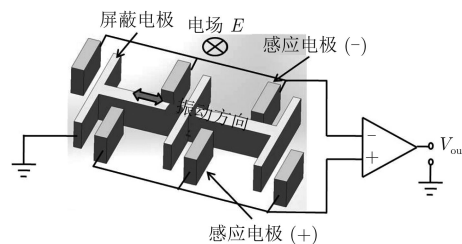


图1 MEMS电场传感器敏感芯片感应原理

场; A 为感应电极的感应面积。 i_s 经过差分放大转换成电压 V_{out} , 通过测量电压反演出被测电场大小。

3 探头设计

用于工频电场测量的MEMS电场传感器探头主要包括封装芯片、前置放大电路以及外壳等。MEMS电场敏感芯片检测电极表面电荷的变化, 采用电荷放大器作为其第1级放大电路。由于敏感芯片采用差分设计方案, 所以需要两路电荷放大器。电荷放大器的输出通过差分电路将两路放大信号输出合成一路。已设计的MEMS电场敏感芯片的前置放大电路如图2所示。

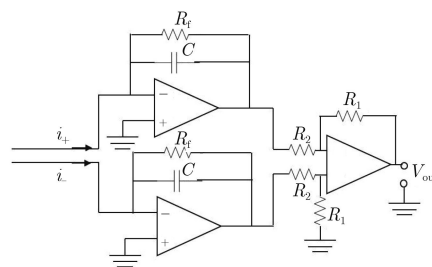


图2 MEMS电场敏感芯片前置放大电路

由于芯片输出的电流只有pA量级, 基本被淹没在串扰噪声里面, 所以低噪声前置放大电路的设计异常关键。在实际的PCB布板设计过程中, 为了避免芯片的驱动信号串扰造成输出信号噪声过大, 通常需要严格对称布置两路差分输出信号的运放和走线。已研制的MEMS工频电场测量探头如图3所示。探头外壳采用绝缘材料, 呈圆柱状, 直径为 $\Phi 19$ mm, 高度为79 mm。

4 输出信号分析及解调算法

当MEMS电场敏感芯片施加激励电压时, 屏蔽

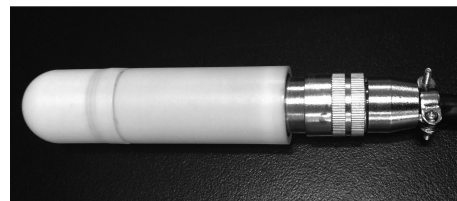


图3 MEMS工频电场测量探头

电极周期振动, 在外界电场 E 作用下, 芯片感应电极的电荷量发生周期性变化, 调制被测电场, 在某一时刻, 感应电荷量 Q 可表示为^[16]

$$Q(t) = k_q X_r E \sin(\omega t + \theta) + Q_0 \quad (2)$$

式中, k_q 为施加 1 kV/m 电场时, 屏蔽电极在单位振幅状态下感应电极的电荷变化量; X_r 为谐振态时屏蔽电极的振幅; θ 为激励信号与芯片输出信号之间的相位差, 一般约为 90° 。

当施加交变电场时, 电场强度为

$$E = E_0 \sin(\omega_e t + \varphi) \quad (3)$$

式中, E_0 为交变电场的幅值, ω_e 为交变电场的频率, φ 为交变电场的初相位。

将式(3)代入式(2), 可得

$$Q(t) = k_q X_r E_0 \sin(\omega_e t + \varphi) \sin(\omega t + \theta) + Q_0 \quad (4)$$

此时 MEMS 电场敏感芯片的输出电流为

$$i = \frac{dQ}{dt} = k_q X_r E_0 [\omega_e \cos(\omega_e t + \varphi) \sin(\omega t + \theta) + \omega \sin(\omega_e t + \varphi) \cos(\omega t + \theta)] \quad (5)$$

则 MEMS 电场敏感芯片经前置放大电路后的输出电压表示为

$$V_{out} = iR \quad (6)$$

其中, R 为前置放大电路的等效电阻。令

$$\left. \begin{aligned} M &= k_q X_r E_0 R \omega_e \cos(\omega_e t + \varphi) \\ N &= k_q X_r E_0 R \omega \sin(\omega_e t + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则有

$$V_{out} = M \sin(\omega t + \theta) + N \cos(\omega t + \theta) \quad (8)$$

MEMS 电场敏感芯片的振动频率大约为 3 kHz, 工频电场的频率为 $\omega_e = 50$ Hz/60 Hz, 本文以 50 Hz 为例。由式(5)可知, MEMS 电场敏感芯片输出的有用信号的频率为 (3000 ± 50) Hz。为了有效抑制工频干扰噪声对 MEMS 工频电场测量探头带来的影响, 探头输出首先需经过高通滤波器滤波, 滤波器的截止频率取值范围为 $\omega_e/2\pi < f_H < (\omega - \omega_R)/2\pi$, 本文取值为 2000 Hz。

MEMS 工频电场测量探头输出受激励信号的同频干扰噪声及其它噪声的影响较大, 信噪比低, 直接难以峰值提取。为了抑制同频干扰噪声及其它噪声的影响, 采用正交相关检测原理对探头输出信号进行解调^[17]。正交相关检测的两路相敏检测输出采用带通滤波器滤波, 带通滤波器的中心频率为 ω_e 。经滤波后的两路信号可表示为

$$\left. \begin{aligned} Y &= M \cos \theta - N \sin \theta \\ X &= M \sin \theta + N \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

最终, 正交相关检测输出为

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{M^2 + N^2} \\ &= |k_q X_r E_0 R| \sqrt{\omega_e^2 + (\omega^2 - \omega_e^2) \sin^2(\omega_e t + \varphi)} \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可知, 正交相关检测输出 V 与交变电场的幅值 E_0 呈线性关系, 且它的频率近似为 $2\omega_e$ 。此时采用峰值提取的方式可直接获取交变电场的响应值。

5 测试系统设计

MEMS 工频电场测量系统整体框图如图 4 所示。系统主要包括传感器探头、驱动电路、NI 无线信号采集卡、电源模块以及上位机等。

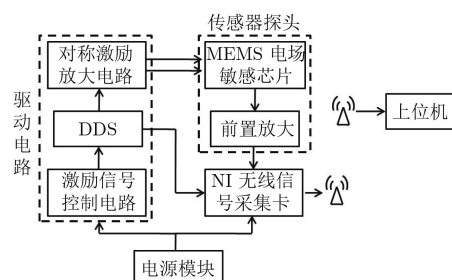


图 4 MEMS 工频电场测量系统整体框图

MEMS 电场敏感芯片采用直接数字式频率合成器 DDS (Direct Digital Synthesizer) 产生传感器激励信号。NI 无线信号采集卡将探头的输出信号和激励信号采集后以无线方式发送到上位机进行信号解调。数据无线传输保证了 MEMS 工频电场测量探头与地隔离, 测量不受地电势的影响, 提高了测量的准确性, 也提高了系统的安全性。

基于 Labview 可视化编程语言实现上位机电场幅值解调算法, 软件流程图如图 5 所示。在软件开始工作之前, 首先进行上位机与 NI 无线采集卡之间连接。成功后, 设置数据采样率和采样数, 并启动软件开始数据采集。由第 3 节可知, 探头的输出信号在解调之前先经历一次高通滤波, 滤除工频干扰噪声。正交相关检测需要两路相位差为 90° 的参考信号, 采集卡采入的激励信号作为其中一路参考信号, 对该路参考信号进行希尔伯特变换后生成相位差为 90° 的另一路参考信号。然后依据正交相关检测方法进行运算, 对产生的 X , Y 路输出信号进行带通滤波, 提取被测试的工频电场频率的信号。之后进行矢量合成和相位计算, 检测矢量合成波形的峰值或有效值。最后根据标定参数计算电场值, 绘制测试曲线并保存数据。完成一次数据采集处理后, 再次采集数据并重复整个数据处理过程, 直到结束为止。已研制的 MEMS 工频电场测试系统样机如图 6 所示。

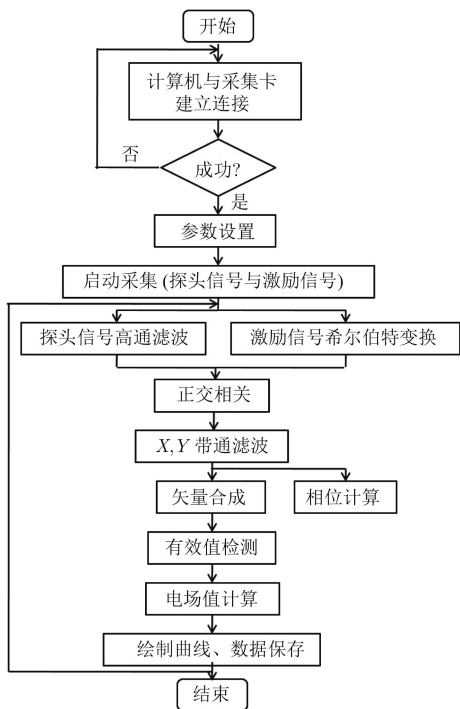


图5 信号解调软件流程图

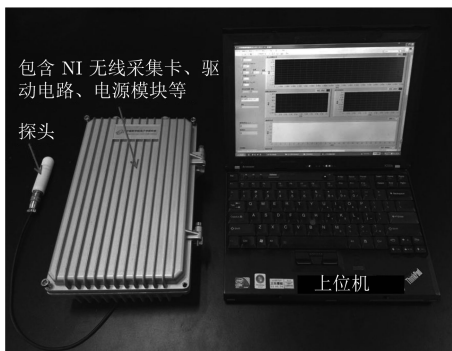


图6 MEMS工频电场测量系统样机

6 试验结果及分析

6.1 零点温度试验

MEMS工频电场测量探头的零点输出主要来源于MEMS电场敏感芯片激励信号的同频串扰噪声(频率为 ω)和工频干扰噪声,而同频串扰噪声易受环境温度影响,随环境温度的变化而变化。为了抑制敏感芯片激励信号同频串扰噪声的影响,采用本文第3节描述的正交相关检测原理并利用带通滤波器(中心频率为 ω_c)提取需要检测的信号,则MEMS工频电场测量系统的零点输出将不受同频串扰噪声的影响,即系统的零点输出不会随环境温度

的变化而改变。为了验证上述分析结果,在高低温交变湿热试验箱中进行系统零点温度特性试验,图7为测试得到的MEMS工频电场测量系统的零点输出温度特性曲线,表1为对应的测试数据,在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,测试温度点的步长为 10°C ,系统零点输出的最大变化量为 1.91 V/m ,仅占满量程输出(100 kV/m)的 0.02% ,可忽略不计,该测试结果与上述分析结果相吻合。

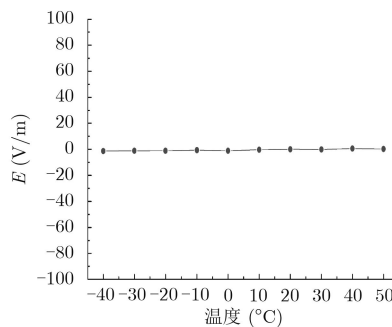


图7 MEMS工频电场测量系统零点温度特性曲线

6.2 外场试验

在输电线路下开展MEMS工频电场测量系统电场测试试验,为了验证测量的准确性,采用德国Narda公司的EFA-300电磁场分析仪进行比对测试。

首先选择在典型的 10 kV 输电线路下进行试验,测量输电线路正投影下水平面上与输电线路垂直方向 $0\sim 10\text{ m}$ 范围内的电场分布,测量点离地高度 1.5 m ,图8是 10 kV 输电线路测试现场照片。输电线路下电场分布测试与计算结果^[18]如图9所示,表2为其对应的测试与计算数据。现场测试结果初步表明:MEMS工频电场测量系统与Narda EFA-300的测试结果以及理论计算结果具有良好的一致性,在测试区间内系统测量的最大相对偏差约为 10% ,曲线趋势和大小真实反映了输电线路下的电场分布特征。

为了进一步验证MEMS工频电场测量系统的准确性,在 110 kV 同塔多回输电线路复杂电场环境下进行电场测试。图10为同塔多回输电线路照片,测量点离地高度仍然为 1.5 m ,从左侧铁塔输电线路正下方开始向右侧测量,间隔为 2 m ,共测量 12 个点。图11为同塔多回输电线路电场测试曲线,表3为对应的测试数据。测试结果表明:在 110 kV 同塔多回输电线路复杂电场环境下,MEMS工频电场测

表1 MEMS工频电场测量系统零点温度特性测试数据

温度($^{\circ}\text{C}$)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
零点(V/m)	-1.39	-1.22	-1.13	-0.74	-1.22	-0.39	-0.04	-0.22	0.52	0.13



图 8 10 kV输电线路测试现场照片

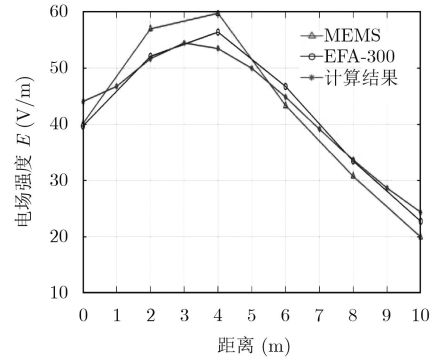


图 9 10 kV输电线路下电场测试与计算曲线

表 2 10 kV输电线路下电场测试与计算数据

距离(m)	0	2	4	6	8	10
MEMS (V/m)	40.08	56.90	59.66	43.32	30.68	19.89
EFA-300 (V/m)	39.65	52.02	56.33	46.68	33.39	22.68
计算值(V/m)	44.0	51.6	53.4	44.8	33.6	24.3



图 10 同塔多回输电线路照片

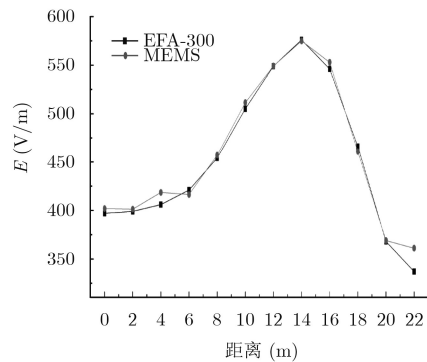


图 11 同塔多回输电线路电场测试曲线

表 3 同塔多回输电线路电场测试数据

距离(m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
MEMS (V/m)	401.87	401.22	418.45	416.32	456.93	511.43	549.13	575.03	552.92	460.72	369.00	361.08
EFA-300 (V/m)	397	399	406	421	454	505	549	576	546	466	368	337

量系统与Narda EFA-300的测试结果仍然具有良好的一致性，在该测试区间内两者的最大电场测量偏差为6.7%。

7 结论

本文基于高性能的MEMS电场敏感芯片，首先设计出了高分辨力的MEMS工频电场测量探头。然后针对芯片的输出信号特征，提出了一种可抑制工频干扰噪声和背景噪声的微弱信号解调算法。之后采用NI无线采集卡研制出了MEMS工频电场测量系统样机，并基于Labview结构和模块化设计方法，成功在上位机实现探头输出信号滤波，相关解调以及工频电场信号的复原。MEMS工频电场测量

系统在10 kV输电线路下的电场测试结果与Narda EFA-300的测试结果以及理论计算结果具有良好的一致性，测量的最大相对偏差约为10%，测试曲线趋势和大小真实反映出了输电线路下电场分布特征。在110 kV同塔多回输电线路复杂电场环境下，MEMS工频电场测量系统与Narda EFA-300的测试结果仍然具有良好的一致性，两者最大电场测量偏差为6.7%。

参考文献

[1] 汪金钢, 林伟, 李健, 等. 电容式交变电场传感器与工频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 21-23.
WANG Jingang, LIN Wei, LI Jian, et al. Study on

- capacitive alternating electric field sensor detecting test on power frequency electric field[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(9): 21–23.
- [2] KAPLAN B Z. Duality of the electric covering field mill and the fluxgate magnetometer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(4): 2306–2315. doi: [10.1109/20.703870](https://doi.org/10.1109/20.703870).
- [3] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, and HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(1): 8–13. doi: [10.1109/61.847221](https://doi.org/10.1109/61.847221).
- [4] HORENSTEIN M N and STONE P R. A micro-aperture electrostatic field mill based on MEMS technology[J]. *Journal of Electrostatics*, 2001, 51(1): 515–521.
- [5] RIEHI P S, SCOTT K L, MULLER R S, *et al.* Electrostatic charge and field sensors based on micromechanical resonators[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(5): 577–589. doi: [10.1109/JMEMS.2003.818066](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2003.818066).
- [6] BAHREYNI B, WIJEWEERA G, SHAFAI C, *et al.* Analysis and design of a micromachined electric-field sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(1): 31–36. doi: [10.1109/JMEMS.2007.911870](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2007.911870).
- [7] KONBAYASHI Takeshi, OYAMA Syoji, TAKAHASHI Masaharu, *et al.* Microelectromechanical systems-based electrostatic field sensor using Pb (Zr, Ti)O₃ thin films[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(9): 7533–7536. doi: [10.1143/JJAP.47.7533](https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7533).
- [8] PENG Chunrong, CHEN Xianxiang, BAI Qiang, *et al.* A novel high performance micromechanical resonant electrostatic field sensor used in atmospheric electric field detection[C]. Proceedings of 19th IEEE MEMS, Istanbul, Turkey, 2006: 698–701.
- [9] PENG Chunrong, YANG Pengfei, WEN Xiaolong, *et al.* Design of a novel micromachined non-contact resonant voltage sensor for power distribution systems[C]. Proceedings of IEEE Sensors 2014, Valencia, Spain, 2014: 978–981.
- [10] 闻小龙, 彭春荣, 方东明, 等. 基于共面去耦结构的三维电场测量方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2504–2508. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01921](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01921).
- WEN Xiaolong, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* Measuring method of three dimensional atmospheric electric field based on coplanar decoupling structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2504–2508. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01921](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01921).
- [11] WEN Xiaolong, FANG Dongming, PENG Chunrong, *et al.* Three dimensional electric field measurement method based on coplanar decoupling structure[C]. Proceedings of IEEE Sensors 2014, Valencia, Spain, 2014: 582–585.
- [12] WEN Xiaolong, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* High performance electric field micro sensor with combined differential structure[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2014, 31(2): 143–150. doi: [10.1007/s11767-014-3170-2](https://doi.org/10.1007/s11767-014-3170-2).
- [13] WANG Yu, FANG Dongming, FENG Ke, *et al.* A novel 2-dimensional electric field sensor based on in-plane micro rotary actuator[C]. Proceedings of IEEE Sensors 2014, Valencia, Spain, 2014: 1924–1927.
- [14] 杨鹏飞, 彭春荣, 张海岩, 等. SOI微型电场传感器的设计与测试[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2771–2774. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01285](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01285).
- YANG Pengfei, PENG Chunrong, ZHANG Haiyan, *et al.* Design and testing of a SOI electric-field microsensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2771–2774. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01285](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01285).
- [15] YANG Pengfei, PENG Chunrong, ZHANG Haiyan, *et al.* A high sensitivity SOI electric-field sensor with novel comb-shaped microelectrodes[C]. 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators & Microsystems (transducers'11), Beijing, China, 2011: 1034–1037. doi: [10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969165](https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969165).
- [16] YANG Pengfei, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* Design, fabrication and application of an SOI-based resonant electric field microsensor with coplanar comb-shaped electrodes[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2013(23): 055002: 8pp.
- [17] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2011: 190–191.
- [18] 刘华麟. 高压输电线、变电站电磁场环境测量方法研究[D]. [博士学位论文], 重庆大学, 2005.
- 全杰: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为电力智能设备与传感技术.
- 雷煜卿: 男, 1975年生, 高级工程师, 研究方向为电力系统通信及传感技术.
- 杨鹏飞: 男, 1986年生, 博士后, 研究方向为MEMS传感器设计与加工、低频电磁场探测、大气电场探测、工频电场检测等.