

面向新型电力系统的微型电场传感技术

韩志飞¹, 胡军¹, 李立涅², 何金良^{1*}

- (1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;
2. 中国南方电网有限责任公司, 广东省 广州市 510623)

Progress of Micro Electric Field Sensing Technology for New Power System

HAN Zhifei¹, HU Jun¹, LI Licheng², HE Jinliang^{1*}

- (1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
2. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The construction of highly information-based new power system requires the establishment of information system that matches the traditional power grid. The sensor network composed of various types of advanced sensors is the data foundation of the information system. Among various physical quantities, electric field measurement has important value. Electric field measurement can be applied to applications such as voltage measurement, equipment monitoring, lightning warning, etc. Traditional electric field measurement devices, such as field mills, are bulky and costly, and cannot be applied to the flexible and wide-area arrangement of electric field sensing nodes. Micro electric field sensors are a kind of electric field measurement device with small size and high performance, which is of great significance to the electric field measurement in new power system. In this paper, we introduce the development of micro electric field sensors with different principles and the application scenarios of micro electric field sensors. We also summarize the challenges and prospect the development of micro electric field sensors.

KEY WORDS: new power system; electric field measurement; micro electric field sensor

摘要: 高度数字化是新型电力系统的重要特征, 需要构建广域、分布式电网深度全景信息实时采集的传感网络作为其支撑。电场信息是电力系统中的基础物理量。电场测量可以应用于电压反演、设备监测、雷电预警、电磁环境监测等应用场景。传统电场测量方法, 如场磨式电场测量仪等, 往往体积大、成本高, 无法适用于电场测量节点的灵活与广域布置。微型电场传感器是一类基于微加工工艺制备的小尺寸、高性能电场测量设备, 对于电场测量的数字化、小型化、灵活化

需求具有关键意义。该文介绍不同原理微型电场传感器的发展现状, 同时列举微型电场传感器的典型应用场景, 并对电场传感器发展所面临的挑战进行总结与展望, 指出新型电力系统中电场测量面临的挑战与未来发展趋势。

关键词: 新型电力系统; 电场测量技术; 微型电场传感器

0 引言

随着人类社会与经济的高速发展, 全球能源短缺与气候变化问题日益严峻, 碳减排成为全球共识。2020年9月, 我国提出“在2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”的目标。在“双碳”的目标下, 发展低碳高效的能源经济结构, 改善我国高能耗经济增长模式成为迫切需求^[1]。长期以来, 我国电力系统处于能效较低的状态, 设备利用、新能源利用、需求侧管理均存在效率不足的问题, 每一千瓦时电能产生的GDP依然落后于世界平均水平。未来我国的能源体系建设势必形成以可再生能源为主体的新型综合能源系统。如何提升综合能源系统效率, 从发、输、配、用及应用环境等环节全方位实现电力系统的监测与管理, 成为亟待解决的技术问题。

信息化时代下, 赋予电力系统以数字化、智能化内容, 是未来新型电力系统的重要特征。通过传感网络的广域布置, 构建与电力系统相配套的信息网络, 实现能源电力从生产侧到输送侧, 再到用户侧的信息透明与实时监测管理^[2-3]。信息化的电力网络在未来将作为新型电力系统的核心, 承担起构建安全高效现代能源体系的任务, 大大提升电力系统的稳定性与运行效率^[4]。电力系统信息化的核心在于数字获取, 即在电力系统的各个环节实现大批量

基金项目: 国家自然科学基金项目(51720105004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51720105004).

数据的实时上传。数字获取的基础是先进传感技术^[5]。小尺寸、低功耗的小微智能传感器以及集成先进传感器的智能化设备可以实时获取电力系统中电压、电流、温度等物理信息，为信息网络提供数据支撑。通过大规模数据的获取，利用信息网络进行互联，使用先进管理控制算法，结合云端计算与边缘计算，信息化电力系统可以实现电力与能源网络的数字化、信息化、智能化管理，构建以全景信息为支撑的智慧电网。

本文将“电场强度”简称为“电场”。电场信号是电力系统中最具有监测需求的物理量之一。电场信号包含了大量电网和设备运行信息，对于实现电力系统信息化管理具有重要意义。一方面，多点电场测量可以用于电压信息的反演，从而代替传统电压互感器，实现高电压的非接触式测量。这种广域电压测量手段可以用于电力系统状态监测与故障诊断、配网监测等应用场景。另一方面，电场

测量可以应用在电气设备在线监测、雷电预警、气象监测等场合。

电力系统中电场信号具有宽频、宽幅值范围的特征。电场频率除了工频和直流信号外，还包括大量中低频、中高频及高频暂态信号，频率范围从 0 至 GHz 量级，幅值范围从 V/m 至 MV/m 量级，如图 1 所示。此外，电力系统中的电场测量还面临强电磁干扰，并且具有高精度和实时性的测量要求。传统的电场测量设备，如场磨式电场测量仪等，往往体积大、成本高、功能单一，无法满足未来电网中复杂的测量需求。微型电场传感器是一类基于微加工工艺制备的小型化电场测量设备。微型电场传感器具有尺寸小、成本低、易于批量生产等特点，因此适用于传感器的大批量灵活布置。同时，相较于传统电场测量设备，微型电场传感器往往具有更高的性能和更加广泛的适用范围。目前，国内外研究团队对不同原理的微型电场传感器进行了研究。

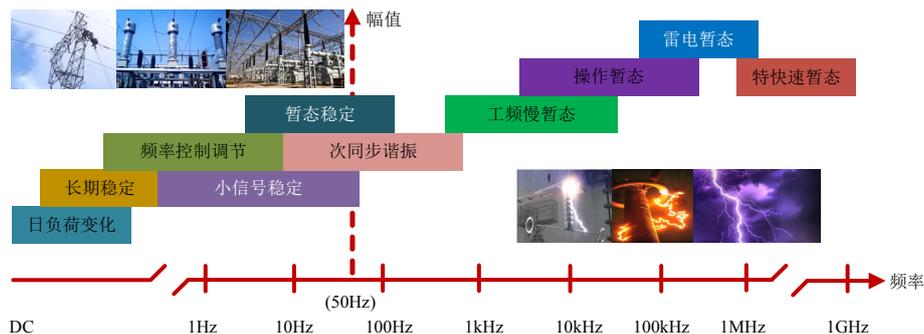


图 1 电力系统电场频率范围

Fig. 1 Electric field frequency range in power system

本文基于新型电力系统的电场测量需求场景，介绍基于不同原理的微型电场传感器，总结不同原理电场传感器的优势、局限以及适用范围，为不同需求下的电场传感器的选择提供参考。同时，本文针对电场传感器的典型应用场景进行分析与介绍，并挖掘未来电场传感器可能的应用价值。最后，本文总结新型电力系统中电场测量面临的挑战与未来发展趋势。

1 微型电场传感器基本原理

微型电场传感器是一类小尺寸、高性能、易于批量制备的电场测量设备。微型电场传感器一般具有以下特点。

1) 小尺寸。微型传感器本体尺寸一般在毫米量级，甚至微米量级。小尺寸的传感器具有诸多优势。在介入式电场测量中，小尺寸传感器可以减小传感器材料对空间电场的畸变，减小测量设备对外

部电场的影响。同时，小尺寸传感器可以方便灵活地布置在设备内部。此外，微型化的电场传感器可以方便地与信号处理模块、控制模块、通信模块、储能模块等集成，构成小型化的电场传感节点。

2) 高性能。相较于传统电场测量设备，微型电场传感器在测量范围、灵敏度、分辨率等方面均表现出高性能。电场传感器性能主要包括静态性能和动态性能。静态特性主要包括：①线性度，传感器输出响应曲线偏离拟合直线的程度；②灵敏度，单位电场强度变化所引起的传感器输出量变化；③迟滞，电场正、反行程变化期间输入输出特性曲线不重合的程度；④漂移，输入电场不变的情况下，传感器输出量随着时间变化的现象；⑤分辨率，传感器能检测到输入电场最小变化量的能力；⑥阈值，能使传感器的输出端产生可测变化量的最小输入电场，即零点附近的分辨率；⑦功耗，传感器正

常工作时消耗的功率。动态特性是指待测电场为随时间变化的信号时，传感器输出与输入之间的关系。主要动态特性指标包括时域单位阶跃响应和频域频率特性等。

3) 标准化制备流程。微型电场传感器往往基于微加工技术进行微型化制备。微加工技术是指加工尺寸在微米量级及以下的加工方法。基于硅、氮化硅、碳化硅等晶圆，通过光刻与微加工工艺的配合，利用设计的掩模版，可以进行不同结构的图形化设计，并实现特定功能。常用的微加工工艺包括光刻、ICP 刻蚀、湿法刻蚀、金属蒸镀等。基于微加工技术进行制备可以通过标准化的制备流程设计对传感器件进行批量生产，从而保证传感器性能的一致性，同时降低传感器生产成本。生产数量越多，单个传感器的生产成本越低。

微型电场传感器根据其测量原理可分为基于电光效应的微型电场传感器、基于感应电荷的微型电场传感器、基于逆压电效应的微型电场传感器，以及基于静电力的微型电场传感器等^[6]。

1.1 基于电光效应的微型电场传感器

基于电光效应的微型电场传感器是目前研究较为深入、技术较为成熟的电场传感技术。这类电场传感器利用电光晶体的电光效应将电场信息转化为光学信号，再将光学信号转化为电压信号等可测信号，从而实现电场的测量。目前，这类传感器已经在变电站母线监测等应用场合投入实际应用。

电光效应是指某些各向同性的透明材料在电场作用下显示出光学各向异性，导致折射率变化的现象。常用的电光晶体包括钛酸锂(LiTaO₃)、铌酸锂(LiNbO₃)等。电光晶体折射率的变化主要是由晶体在电场作用下极化强度的变化引起的^[7]，电光晶体折射率与外加电场的关系为

$$n(E) = n_0 + (-\frac{1}{2}\gamma n_0^3 E) + (-K\lambda E^2) + \dots \quad (1)$$

式中： n_0 为没有外电场时材料的折射率； $n(E)$ 为材料在外电场作用下的折射率； E 为电场强度。在式(1)中， $-\gamma n_0^3 E/2$ 是晶体折射率关于电场强度的线性项，称为 Pockels 效应^[8]， γ 称为线性电光系数。Pockels 效应仅存在于非中心对称晶体中，例如 LiNbO₃、LiTaO₃ 和 GaAs。 $-K\lambda E^2$ 是晶体折射率关于电场强度的二次项，称为 Kerr 效应^[9]， K 称为电光克尔常数， λ 是入射光的真空波长。对于固体材料，由于 Pockels 效应比 Kerr 效应更为显著，同时

线性电光效应可以保证传感器的线性度，因此在电场传感器的设计中更多地使用 Pockels 效应。对于液体材料，Kerr 效应更为显著。

Mach-Zehnder 干涉仪是基于电光效应的电场传感器的常用结构^[10-14]。图 2 为基于 Mach-Zehnder 干涉仪的电场传感器结构示意图。

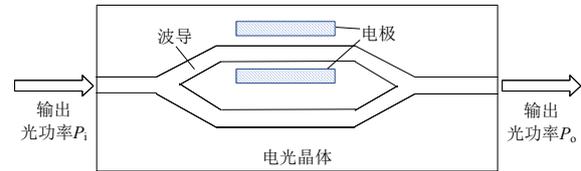


图 2 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的电场传感器结构^[11]

Fig. 2 Electric field sensor based on Mach-Zehnder interferometer (Copyright 1986 AIP Publishing)

传感器以电光晶体为基底进行制备。在工作时，输入的线偏振光首先被第一个 Y 型分叉分成具有相等功率的两部分。两束光分别在电光晶体基底上的两条平行光波导中传输，其中一束光穿过电光晶体位于电场中的部分，另一束光作为参考。根据 Pockels 效应，两束光由于折射率不同而产生相位差，两束光的相位差由可计算如下：

$$\Delta\varphi = \frac{\pi\Gamma n_e^3 \gamma_{33} L}{\lambda_0} E \quad (2)$$

式中： Γ 为电场与晶体中光波的重叠因子； n_e 为电光晶体的本征折射率； γ_{33} 为晶体的线性电光系数； L 为晶体的有效长度； λ_0 为光的波长； E 为外加电场的强度。

当 $\Delta\varphi$ 为 π 时，施加的电场称为半波电场 E_π 。具有相位差的两束光在第二个 Y 型分叉处叠加。输出偏振光振幅与两束光的相位差有关，光功率调制器的输出功率为

$$P_o = \frac{P_i}{2} [1 + \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi)] \quad (3)$$

式中： P_i 为输入激光功率； P_o 为输出激光功率。因此，可以通过光接收器测量输出的光功率信号来检测电场强度。这种光学电场传感器的分辨率可达 1V/m，带宽达到了 300MHz。

通过改进传感器结构可以提升传感器的分辨率和频率响应特性。例如，通过在波导上设计天线可以使传感器达到 1mV/m 的电场分辨率和 3GHz 的带宽^[15-18]。通过设计带有电阻天线的电场传感器，可以使传感器的最小可测电场达到 22mV/m，带宽达到 10GHz 以上^[19-21]。

除了 Mach-Zehnder 干涉仪，基于电光晶体的

电光效应的光学电场传感器还可以采用其他光路结构,如基于耦合干涉的光学电场传感器^[22]、基于共路干涉(common-path interferometer, CPI)的电场传感器^[23]等。

尽管上述传感器具有极高的分辨率与带宽,但由于传感器结构和原理的限制,所提出的传感器只能用于测量低电场。对于高电场测量场景,光学电场传感器测量系统必须由分立的光学元件组成,通过光纤进行光信号的传输。为了实现电光效应电场传感器在高电压/电场领域的应用,需要通过优化电极和天线的结构,对电场传感器进行针对性设计与研究^[24-25]。用于高电压/电场测量的光学电场传感器电极及天线结构如图3所示^[26],包括带有2个垂直天线的电极(见图3(a))、带有2个水平天线的电极(见图3(b))和单个电极(见图3(c))。通过使用不同的电极和天线设计,光学电场传感器可以达到10~100kV/m的半波电场和超过100MHz的带宽^[27]。带有单屏蔽电极的光学电场传感器半波电场可达2000~8000kV/m^[28]。

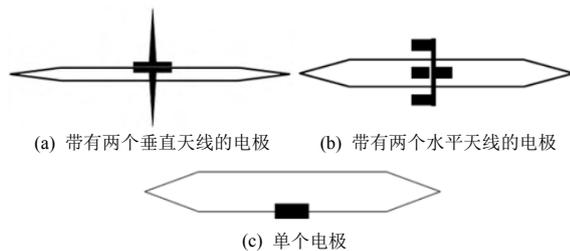


图3 不同电极结构的光学电场传感器^[26]

Fig. 3 Electric field sensor with different dipole electrodes (Copyright 2007 IEEE)

基于其他光路结构的光学电场传感器也可以在高电压/电场的测量场景进行应用。如基于耦合干涉的光学电场传感器,电场测量范围达到了1000kV/m^[29];基于共路干涉的电场传感器,可以实现100MV/m半波电场的测量^[30-31]。

为了将光学电场传感器应用于高电场中,电场传感测量系统设计如图4所示。集成光学电场传感器的传感器探头放置于电场中,激光源和激光接收

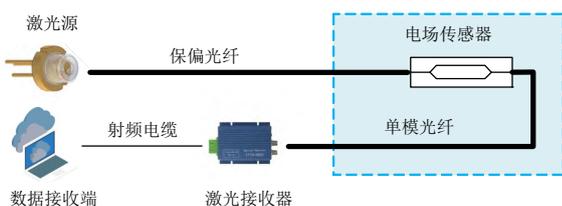


图4 基于Mach-Zehnder干涉仪的电场传感器结构^[6]

Fig. 4 Electric field sensor based on Mach-Zehnder interferometer (Copyright 2021 IEEE)

器分别通过保偏光纤和单模光纤连接到传感探头,以保证光学设备与高压侧保持安全距离。这类光学电场传感器已应用于变电站母线等关键节点的过电压测量中^[32]。

近年来,还出现了其他系统构架的测量高压、高电场的电场传感器^[33-34],部分研究成果也已在电网中投入使用^[35-36]。除了Pockels效应外,也有利用Kerr液体构建波导和干涉光路进行光学电场传感器的研究,但这方面研究尚不成熟^[37]。

基于电光效应的电场传感器是目前研究较为成熟、测量性能较好的微型电场传感器,具有传输无损、分辨率高、测量频带宽、动态响应快等优点,在电场的高分辨率实时测量中具有良好性能,适用于电力系统中关键节点的高精度电场测量。然而,尽管光学电场传感器本身尺寸较小,但由于光学测量系统需要高质量偏振光源以及光接收器,这类测量系统往往整体体积较大、结构复杂,单套测量系统成本高,无法满足大规模安装的需求。同时,由于电光晶体存在热释电效应以及测量系统对激光源的高质量要求,光学电场传感器还存在温度稳定性差、光学偏置不可控等问题。因此,低成本集成光源和光接收器以及高温稳定性是基于电光效应的电场传感器面临的挑战。

1.2 基于感应电荷的MEMS微型电场传感器

场磨式电场测量仪是一种传统的电场测量方法。这种电场测量设备由屏蔽片、感应片、光电码盘以及电机组成^[38]。随着屏蔽片的旋转,感应片暴露在电场中的面积呈周期性变化,感应片上的感应电荷随之变化,产生感应电流。通过信号处理单元对感应电流进行分析处理,即可实现交直流电场的测量。但场磨式电场测量仪尺寸大、测量精度低,无法进行灵活大范围布置。

基于场磨式电场测量仪的原理,可以通过微机电系统(microelectro mechanical systems, MEMS)技术将场磨微型化,实现基于感应电荷的MEMS微型电场传感器^[39]。MEMS是集成了微型传感器、微型执行器、微型电源、信号处理和电路、通信模块等部件的微型器件或系统。MEMS是一个独立的微型智能系统,尺寸通常只有几毫米甚至更小,其内部结构一般在微米甚至纳米量级。由于成本低、体积小、易于批量生产,基于MEMS的微型电场传感器具有广阔的应用前景。

基于感应电荷的MEMS电场传感器基本结构

如图 5 所示^[40]。传感器包括可以振动的遮蔽电极、固定的感应电极和后端的信号处理电路。在外加激励源的驱动下，接地的遮蔽电极周期性地上下振动。当对传感器施加电场时，由于感应电荷的周期性变化，固定电极上产生感应电流。通过后端电路对感应电流进行处理与测量，即可以实现电场的测量。该微型电场传感器的尺寸约为 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ ，电场分辨率可达 630V/m ，谐振频率约为 8.7kHz ，直流驱动电压为 30V ，交流驱动电压为 5V 。通过将该传感器与跨阻放大器和信号处理电路集成，还可以制造出基于 ModMEMS 工艺的 SOC 芯片。

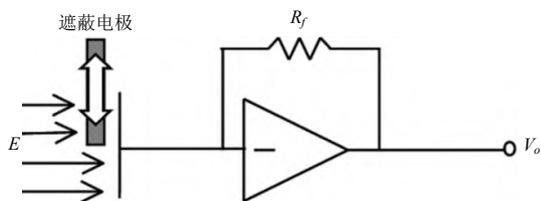


图 5 基于微机械振动的 MEMS 电场传感器^[40]

Fig. 5 MEMS electric field sensor based on micromechanical vibration (Copyright 2003 IEEE)

为了提升该传感器性能，可以从多个方面对这种类型的电场传感器进行改进^[41-42]：1) 驱动方式，包括利用压电效应驱动遮蔽电极和利用热效应驱动遮蔽电极；2) 电极方向，包括平行于被测电场的电极和垂直于被测电场的电极；3) 振动方向，包括垂直振动与水平振动；4) 电极形状，包括梳齿状和阵列状。这些改进有效地提高了电场传感器的分辨率。

压电效应驱动的 MEMS 电场传感器中，遮蔽电极与压电陶瓷相连接^[43]。在高频电源的作用下，遮蔽电极在压电陶瓷驱动下振动，实现正负电极的交替屏蔽。正负极在电场作用下感应出差分信号，经过放大环节与信号处理环节进行测量。实验结果表明，这类电场传感器的分辨率约为 250V/m ，测量电场可达为 2500V/m 。

热驱动的电场传感器主要包括遮蔽电极、感应电极和热驱动结构^[44-46]。使用热驱动可以有效减少机械结构的磨损，同时降低工作电压和功耗。热驱动电场传感器功耗为 $70\mu\text{W}$ ，遮蔽电极的工作频率约为 4200Hz ^[44]。一种具有鱼骨热驱动结构的电场传感器结构如图 6 所示^[46]，这种热驱动的 MEMS 电场传感器使用杠杆结构来放大位移，以获取更高的分辨率。该电场传感器的谐振频率为 3892.2Hz ，电场测量范围为 $0\sim 5\text{kV/m}$ ，分辨率可达 42V/m 。

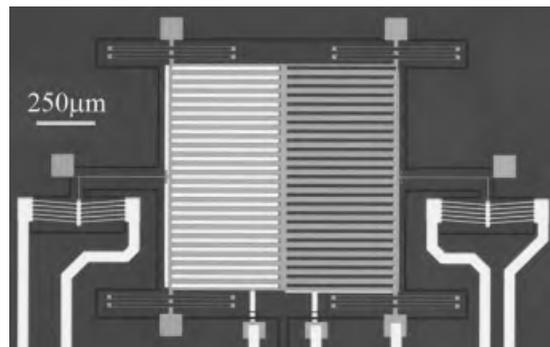


图 6 热驱动 MEMS 电场传感器^[46]

Fig. 6 Thermally actuated MEMS electric field sensor (Copyright 2008 IEEE)

通过对传感器测量系统进行针对性设计，可以将传感器应用于高电压/电场的应用场景^[47-48]。例如，采用双电位独立差分的 MEMS 电场传感器^[48]，采用差分结构，可以消除高压直流线路附近离子流引起的电场测量误差，提升 MEMS 电场传感器在高电压领域的测量精度。

与光学电场传感器相比，基于感应电荷的 MEMS 的电场传感器具有尺寸小，单个器件成本低，适合大批量生产、易于集成等优点。这使得这类传感器适用于传感器大范围布置的应用场景。但由于传感面积的限制，这类传感器难以提升其分辨率。同时，如何保证机械结构的使用寿命，降低驱动功耗也是此类传感器面临的挑战。此外，由于传感器工作时感应电流小，对感应电流的精确测量需要良好的电磁屏蔽手段。

1.3 基于逆压电效应的微型电场传感器

基于逆压电效应的微型电场传感器是近年来电场传感器研究的新方向。当对压电材料施加电场时，材料内部晶格的位移会引起材料的机械变形，这被称为逆压电效应。因此，电场可以通过测量压电材料在电场中的机械变形来进行测量。测量压电材料形变的方法包括电容测量、压阻测量及光学测量等。

基于电容结构测量机械形变的方法被广泛应用于压力传感器、加速度传感器等器件中。同样地，利用电容测量，可以对压电材料在电场下的形变进行测量^[49]。在设计传感器结构时，将两层极化方向相反的压电聚合物薄膜粘合在一起形成电容上电极，将固定金属电极设置为电容下电极。当施加电场时，由于极化方向相反，两层压电薄膜向沿相反方向形变，导致电容上电极弯折，进而导致电容值发生变化。通过测量器件的电容变化，即可以实现

电场的测量。除了空气电容外，也可以使用类似结构测量材料电容，实现对电场的测量^[50]。

基于微加工工艺，可以将电容式的压电电场传感器进行微型化^[51-52]。如将压电薄膜与硅薄膜耦合，当对传感器施加电场时，压电层在电场作用下发生形变，驱动硅薄膜发生变形，从而改变器件中的电容。传感器分辨率可以达到 515V/m，电场测量范围超过 1.5MV/m。将压电薄膜与硅薄膜设计为悬臂结构可以使薄膜获得更大的位移，进而提升电场传感器响应^[52]，如图 7 所示。在电场作用下，压电层作为有源层在水平方向上拉伸或收缩，带动悬臂结构上下弯折，进而改变结构电容。经过结构改进，电容式电场传感器的分辨率可以达到 45V/m。

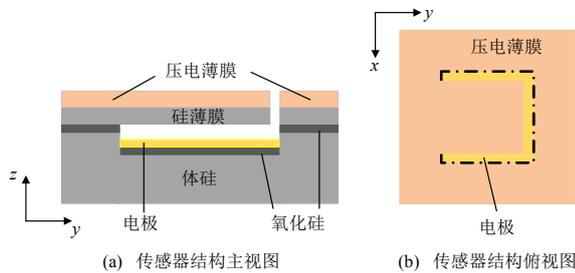


图 7 悬臂电容式电场传感器^[52]

Fig. 7 Microcantilevercapacitive electric field sensor (Copyright 2021 IEEE)

除了电容结构的电场传感器外，还可以通过压阻效应测量压电材料在电场下的形变^[53]，传感器结构如图 8(a)所示。传感器由压电晶体、半导体薄膜、

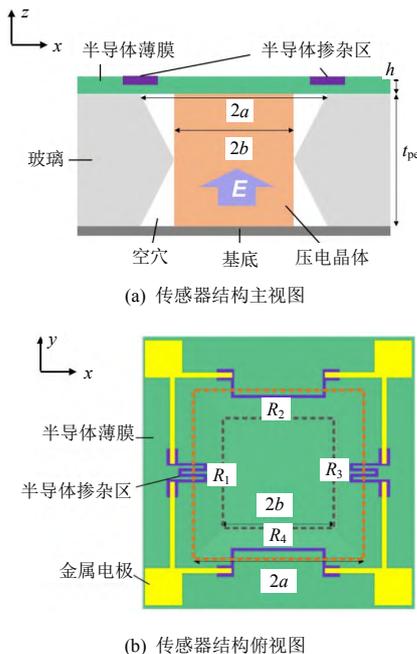


图 8 压电压阻耦合微型电场传感器^[53]

Fig. 8 Electric field sensor based on piezoelectric-piezoresistive coupling (Copyright 2020 IEEE)

玻璃和基底组成。在半导体薄膜上通过离子掺杂形成压阻掺杂区，压阻掺杂区通过金属电极相连形成惠斯通桥结构，如图 8(b)所示。当施加电场时，压电晶体由于逆压电效应发生形变，通过应变耦合使半导体薄膜产生应变。在应变作用下，压阻掺杂区的电阻发生变化。惠斯通桥结构可以将电阻变化转换为输出的差分电压信号。实验结果表明，这种电场传感器的分辨率达到 12.7V/m，传感器的测量频带宽度为 DC-100kHz，最高测量幅值可达 1.57MV/m。

采用光学方法对压电材料形变进行测量也是一种有效手段。如将压电陶瓷(如 PZT)与光栅耦合，压电陶瓷在电场作用下的形变将转化为光栅的形变，导致光栅中心波长发生变化。通过解调光纤光栅中心波长变化的信号可以实现电场的测量^[54-59]。由于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)具有加工简单、成本低、技术成熟等优点，目前被广泛应用于这类传感器中^[60]。光路的解调方法主要包括外置光谱仪、布拉格计以及法布里-珀罗腔。使用双光栅结构进行信号自解调，可以提高电场传感器的测量范围和分辨率，并且抵消温度变化的影响^[61]。

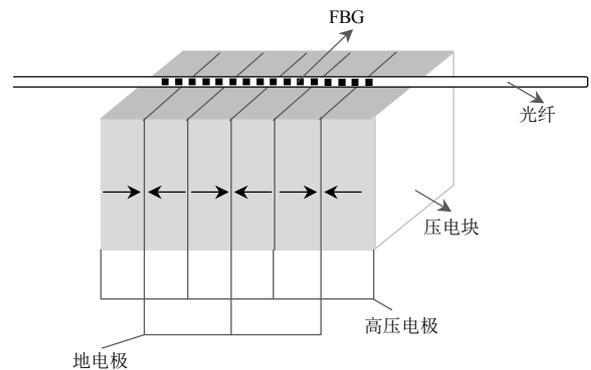


图 9 基于逆压电效应的光学电场传感器^[60]

Fig. 9 Optical electric field sensor based on converse piezoelectric effect (Copyright 2011 IEEE)

除了上述测量方法外，还可以通过逆磁电效应测量材料变形^[62-64]。将压电材料与铁磁材料耦合。在电场作用下，压电材料的形变耦合至铁磁材料，导致铁磁材料的磁畴方向发生变化，进而引起磁化强度及相关参数的变化。通过测量磁场强度可以对电场强度进行表征。

基于逆压电效应的电场传感器具有许多优点。基于微加工工艺，这些传感器往往体积小、成本低，因此适用于大规模传感器布置。同时，压电材料具有频率特性好、温度稳定性高等优点。然而，目前对于这种传感器的研究还不成熟。如何提升传感器的分辨率以及如何将压电材料与微加工工艺结合

是这类传感器目前面临的挑战。

1.4 基于静电力耦合的微型电场传感器

在电场作用下，导体中自由移动的载流子会沿电场方向定向移动至材料表面，以保证导体内部电场为 0。在导体表面聚集的电荷称为感应电荷。感应电荷会受到来自电场的力的作用。当静电力不平衡时，受力部分在静电力作用下会发生形变或位移。基于静电力的微型电场传感器可以利用传感结构在静电力作用下的形变及位移对电场进行测量。

一种利用压电效应测量传感结构在静电力下形变的新型电场传感器结构如图 10 所示^[65-66]。该传感器的结构包括聚四氟乙烯驻极体、末端带有质量块的硅悬臂和两端涂有金属电极的压电层。当施加电场时，硅悬臂受到悬臂与驻极体之间的静电力而发生弯折，使得压电层发生变形并在两端金属电极处产生电荷。因此，待测电场可以通过测量压电层产生的电信号进行测量。同时，带电荷的驻极体能够提供静电场偏置，实现静态工作点的调节和分辨率的提升。该电场传感器可以达到 15.8mV/(kV/m) 的灵敏度以及约 20V/m 的分辨率。

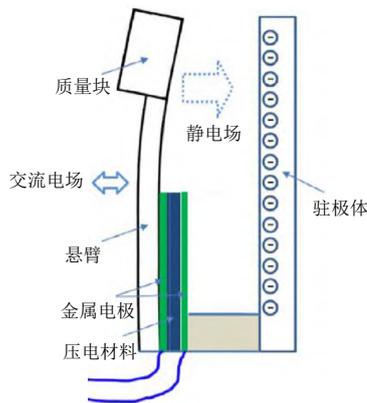


图 10 基于静电力的电场传感器^[66]
Fig. 10 Electric field sensor based on electrostatic force (Copyright 2017 IEEE)

利用光学方法也可以对传感器位移进行测量。

1.2 节中的基于感应电荷的电场传感器需要驱动源对遮蔽电极进行驱动，这就造成了功耗较高的问题。利用静电力进行驱动，可以对 MEMS 电场传感器进行改进^[67]，如图 11 所示。该电场传感器由 MEMS 部分和光学部分组成。带有孔阵列的可移动硅块通过硅弹簧连接到固定区域。玻璃层上附着与可移动硅块的孔相匹配的遮光金属。当在水平方向施加电场时，由于静电力的作用，可移动硅块在水平方向往复振动。可移动硅块上的孔与遮光金属的相对位移会改变 LED 发出光的光通量。利用光电

二极管测量光通量的变化，待测电场可以通过光电二极管的输出电流变化进行测量。该传感器的分辨率约为 $100\text{V/m/Hz}^{-1/2}$ ，测量范围可以达到几十 kV/m。不过，光学模块增加了传感器结构的尺寸与复杂度、制备的难度以及传感器静态功耗。

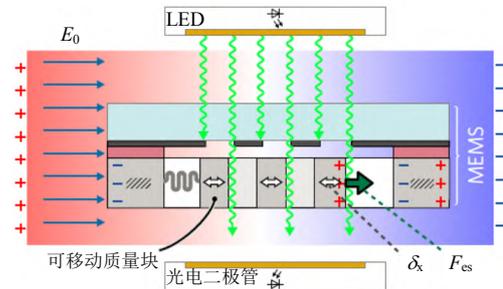


图 11 光学静电力电场传感器^[67]

Fig. 11 Optical electric field sensor based on electrostatic force (Copyright 2018 Springer Nature LLC)

基于光学量检测的静电力电场传感器还包括一类薄膜结构传感器^[68]。传感器由微弹簧以及微弹簧连接的金属薄膜组成。在电场作用下，金属薄膜在静电力的作用下发生位移，并由激光位置传感器对位移进行测量。除了激光位置传感器外，还可以基于类似的工作原理，通过测量光通量的变化对电场进行测量^[69]。

此外，利用压阻效应也可以测量在静电力作用下薄膜的位移，如图 12 所示^[70]。传感器薄膜由硅层与接地金属层组成。薄膜通过硅弹簧与周围固定区域相连接。硅弹簧上设置通过离子掺杂制备的压阻掺杂区。压阻掺杂区通过金属电极连接形成惠斯

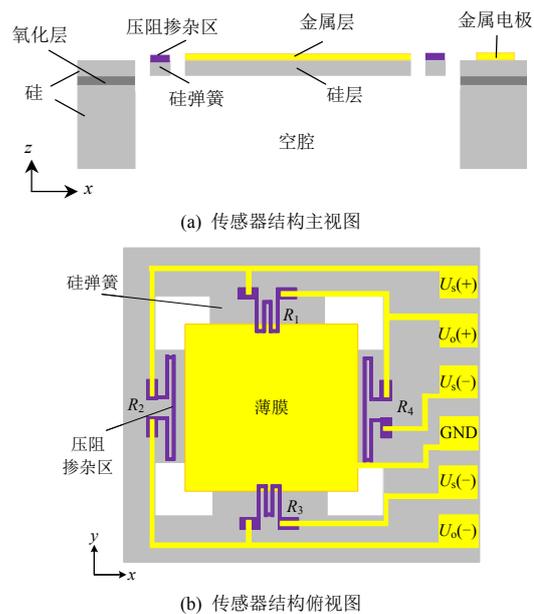


图 12 静电力-压阻效应耦合的电场传感器^[70]

Fig. 12 Electric field sensor based on electrostatic force-piezoresistive effect coupling (Copyright 2021 IEEE)

通桥结构。在电场作用下,金属层受到静电力的作用上下振动,带动硅弹簧振动产生应力。在应力作用下,压阻掺杂区电阻发生变化,由惠斯通桥转化为差分信号。根据测量结果,该传感器分辨率能够达到 $172\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,能够测量 $312\text{V}/\text{m}$ 至 $700\text{kV}/\text{m}$ 的电场。由于薄膜在电场作用下的频率为电场频率的2倍,而电力系统中的谐波大多为奇次谐波,因此传感器输出信号能够方便地与电场耦合噪声分离,达到较高的信噪比。

基于静电力的微型电场传感器利用待测电场作为驱动源,无需额外源对传感器机械结构进行驱动,因此降低了传感器的静态功耗。同时,基于微加工的制备工艺使这类传感器具有小尺寸、低成本以及批量生产的优点。另外,由于静电力驱动的二倍频特性,传感器的输出电压能够与电场耦合噪声分离,提升了传感器的信噪比,但这类传感器的截止频率往往受到传感器机械结构谐振频率的限制。

1.5 其他原理的微型电场传感器

除了上述研究较多的工作原理外,还有一些学者对电场测量的研究进行了一些新原理的尝试^[71],如电致发光效应、电热效应及真空导向电子等。

电致发光效应是指某些材料在外电场作用下产生光辐射的现象^[72]。当外部电场施加到由电致发光材料制成的传感单元时,传感单元会产生光辐射。通过光纤将光信号引出,进行光强测量和信号处理,即可用于电场的测量^[73-74]。由于电致发光效应的灵敏度较低,这类传感器一般用于电压的直接测量或高电场的测量^[75]。类似地,电场测量也可以基于电致变色材料来实现。但这些传感器普遍存在分辨率低、测量范围窄的问题。同时,外部磁场也会影响传感器的工作稳定性。

电热效应是热电效应的逆效应。在绝热条件下,当外加电场引起材料的极化强度变化时,材料温度会发生变化。传统的电热材料包括ITO、镍铬合金和Kanthal材料。除了传统电热材料外,碳纳米管等新型材料也可以用于电场强度的表征。在电场作用下,电子与碳纳米管壁上的粒子碰撞并加速,从而表现出热能的释放^[76]。随着电场强度的增加,散射效应增加,电子的平均自由程缩短,温度会相应升高。需要注意的是,当使用此类材料进行传感时,由于温度对电参数存在非线性影响,需要对温度特性进行考虑和补偿。

基于真空导向电子的电场传感器结构如图13

所示^[77]。该传感器包含一个钨阴极和一对并联的阳极。钨阴极具有低功函数涂层,粘合在玻璃基板上的空腔上。加热阴极时,电子从阴极发射并被阳极收集。当施加电场时,电子在运动过程中路径会被电场力偏转,从而在阳极产生差分电流。真空环境可以减少热传导损失。双阳极的设计可以有效消除共模噪声,提高电场传感器的信噪比。该传感器在10、100和1000Hz下的分辨率分别为470、230和 $140\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。

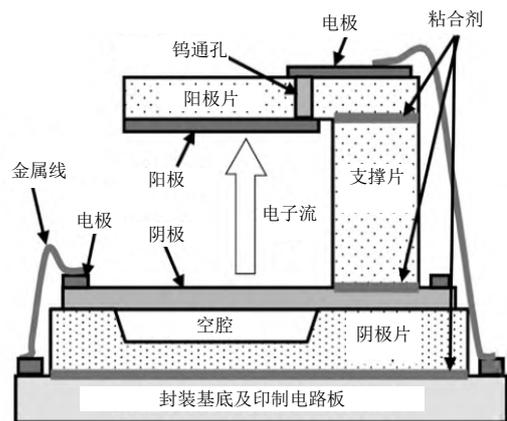


图13 基于真空导向电子的电场传感器

Fig. 13 Structure of vacuum steered-electron electric field sensor (Copyright 2014 IEEE)

这些基于新原理的电场传感器的研究刚刚起步,传感器的原理和性能尚待完善。但基于多种原理的电场传感器设计也证明了电场传感器开发的广泛可能性。

1.6 不同微型电场传感器性能比较

将不同原理的电场传感器典型性能及适用范围列举入表1中。与传统的测量方法相比,新型微型电场传感器在多方面展现出性能优势,具有很高的应用价值。不同原理的微型电场传感器也各有优缺点。基于电光效应的电场传感器具有传输无损、测量频带宽、动态响应快等优点。然而,这类传感器往往成本高、温度稳定性较低。基于感应电荷的MEMS电场传感器体积小、成本低,但同时也存在功耗相对较高、频带窄、分辨率难以提升的缺点。基于逆压电效应的电场传感器同样具有体积小、成本低的优势,同时测量幅值范围广、功耗低。然而,压电材料与微加工工艺的兼容性限制了这类传感器的研究。基于静电力耦合的电场传感器功耗低、信噪比高、制备简单,但传感器的机械结构限制了其测量频带。基于其他原理的传感器也有在性能上突破的可能,但目前研究尚不成熟。

表 1 不同原理的微型电场传感器典型性能

Table 1 Performance of different electric field sensors

原理	幅值范围	截止频率	分辨率	功耗	成本	应用场景
电光效应(低场) ^[21]	>22mV/m	10GHz	0.02V/m	较高	高	生物、医疗、航空航天
电光效应(高场) ^[27-28]	<1MV/m	100MHz	500V/m	较高	高	变电站、电气设备、雷电防护
感应电荷 MEMS ^[46]	<5kV/m	3.9kHz	42V/m	较高	低	变电站、石油化工、大气监测、近电防护
逆压电效应 ^[53]	<1.57MV/m	100kHz	12.7V/m	较低	低	输电线路、配电网、电气设备、大气监测
静电力耦合 ^[68]	<1MV/m	700Hz	17V/m	较低	低	输电线路、配电网、电气设备、大气监测

2 微型电场传感器的应用

基于上述不同原理的微型电场传感器，本节介绍当前以及未来的可能应用场景。微型电场传感器主要应用于新型电力系统中系统与设备的在线监

测。此外，微型电场传感器在雷电预警、电磁环境监测等领域也具有广阔的应用前景，如图 14 所示。不同应用场景中，电场的测量需求不同，对微型电场传感器的性能要求也表现出差异性。



图 14 微型电场传感器应用

Fig. 14 Applications of micro electric field sensors

2.1 基于电场测量的电压反演

在电力系统的传感与测量中，电压测量自 19 世纪电力系统诞生以来就是最重要、最基础的测量内容。一方面，通过电压的测量，可以实现对电力系统运行状态的实时监测，如电能质量分析、电能计量等。另一方面，通过捕获电力系统故障前的瞬态电压的指纹信息，可以实现故障的预测与诊断，使调度人员立即采取行动，避免大规模经济损失^[78-81]。因此，电压测量的准确性直接关系到电力系统的安全稳定运行。传统上，电压互感器是进行高电压测量的主要测量设备。目前，电压互感器仅在变电站和换流站内部的电气设备及母线等关键电压测量节点处进行应用。传统电压互感器功能有限，仅能用于工频电压信号的测量，对暂态过电压、谐波等信号的测量能力有限。同时，这种接入式的测量方法会影响一次系统的运行，容易引发互感器与电网之间的铁磁谐振以及系统侧电压变化等问题。此外，接入式测量方法对测量设备绝缘水平要求高，使得设备绝缘成本高、尺寸大，无法进行广域大范围布置。

因此，传统电压互感器已经无法满足新型电力系统发展的需求。尤其是当接入分布式能源和多样化负载后，电力系统中被测电压信号迅速增加，数据量达到了 PB 量级。亟需发展低成本、小型化的电压测量方法取代传统电压测量设备。

基于电场路径积分方法，可以通过若干点的电场测量对待测电压进行反演，实现电压的非接触式测量。这种电压测量方法相较于传统电压互感器有诸多优势，适用于新型电力系统电压测量新需求。基于电场路径积分方法，国内外研究团队对新型电压互感器以及架空线路工频电压反演等问题进行了研究。新型电压互感器是基于电场测量设计的非接触式电压测量设备。基于 Pockels 电光晶体纵向电光效应的 220kV 光学电压互感器通过对两极间的电场路径进行积分，对电压进行测量。积分结果由一次侧电压决定，而与电场的分布无关^[82]。利用对若干个积分点进行加权求和的方法也可以实现对高电压的测量，常用算法包括 Gauss-Legendre 算法、Newton-Cotes 算法^[83]、Simpson 积分公式等^[84]。

但这些方法的计算精度与电场分布和电场传感器的测量精度有关。电场分布越不均匀,算法本身带来的误差就越大。

对架空线路进行工频电压反演是基于电场测量的电压反演方法的重要应用。采用电场逆问题中的寻优方法可以进行架空线路的逆问题研究,将架空线路中的分裂导线采用等效半径进行假设,有些研究还考虑了架空线路的弧垂问题^[85-87]。这种方法没有将电场路径积分算法引入反演参数识别中。通过电场传感节点的设置^[88-89],可以实现基于优化方法的电场反演方法,可以采用的方法包括高斯算法^[90]、改进高斯算法^[91-92]、牛顿-科特斯算法^[93]等。

基于电场测量的电压非接触式测量方法相较于传统互感器具有诸多优势。由于没有直接电气连接,这种测量方法绝缘难度小,绝缘成本低、尺寸小、造价低,适用于新型电力系统中电压测量节点的大范围布置。同时,由于其内部不含有铁芯、绕组等结构,因此避免了磁饱和、铁磁谐振等问题。此外,这种测量方法可以通过改变电路参数来调整测量带宽,因此频率响应范围宽,测量幅值范围广,能够对交直流稳态暂态电压进行测量。

2.2 电气设备状态监测与故障诊断

当系统中的电气装置或设备,如变压器、绝缘子串、避雷器等发生故障时,传统运维方式往往难以发现故障情况及位置,运维过程较为繁琐。通常来讲,当电气设备发生故障时,其内部电场会发生变化,电场信号会包含故障信息特征。因此,通过在设备内部布置微型电场传感器或传感阵列,可以通过传感器的响应进行故障诊断^[94-95]。以绝缘子串的故障诊断为例。绝缘子串由多个绝缘子单体组成。当其中出现绝缘子单体绝缘电阻低于标准值或降为0时,会影响绝缘子串的可靠性。这样的绝缘子单体称为零值绝缘子。但这种绝缘子单体失效的故障,运维人员往往很难发现,这就造成了系统运行可靠性的隐患。当绝缘子串中出现零值绝缘子时,其余绝缘子单体中的电场将增加。因此,可以通过在第一个绝缘子单体中(接地端)布置电场传感器,判断绝缘子串中是否有绝缘子单体失效。对于变压器,可以采用类似的方法对变压器内部局部放电等故障进行定位,避免了传统上将变压器下线拆掉外壳的运维方式。将得到的电场数据通过深度学习的算法进行处理,还可以用于设备故障类型的诊断^[96-97]。

这种基于微型电场传感器的设备监测与故障诊断方法可以实现设备运行状态的在线监测。通过与其他传感器,如磁场传感器、温度传感器、气体传感器的集成配合,运维人员在数据中心就可以掌握各设备的运行情况,可以显著节省设备运维的工作量,提升运维效率,实现设备的智能化。

2.3 电磁环境测量

电场传感器可以用于空间电磁环境的测量,如应用于输电走廊环境监测、电力工人近电预警、雷电预警、石油化工等领域,下文展开详细叙述。

1) 输电走廊电磁环境测量。随着输电线路电压等级的不断提高,高压输电线路下的电磁环境情况越来越受到重视。高压线路下的电场强度已经成为电磁环境和电磁兼容设计中不可忽视的问题。同时,高压输电线路的地电场强度是确定线路对地最小高度和规划线路走廊宽度的重要依据。通过微型电场传感器,人们可以方便地监测输电线路的电磁环境。

2) 电力工人近电预警。在变电站工作时,电力工人可能因不慎触碰带电物体而引发触电事故。通过设计基于可穿戴式微型电场传感器的防护服,可以实现对工作人员的主动保护,从而降低电工的触电风险,保障电力工人的人身安全。

3) 气象监测和雷电预警。当天气变化时,特别是在雷击发生之前,大气中的电场会发生变化。雷击对电网运行会产生威胁,可能造成线路跳闸和用电设备故障,影响电网稳定运行和供电安全。目前,常用场磨式电场测量仪作为大气电场测量装置。但是,这种电场测量设备存在体积大、寿命短、耗电大、故障率高等问题。通过微型电场传感器监测大气电场的变化,可以实现雷电预警^[98-99]。这对于防雷减灾具有重要意义。同时,基于微型电场传感器的大气电场测量也可以用于未来的气象预报中。此外,大气电场监测已成为航天器发射的重要决策依据之一。通过监测发射场附近的大气电场,可为寻找发射窗口提供重要参考。

4) 石油化工。石油化工行业属于易燃易爆行业,是事故频发的敏感行业之一。雷电、设备静电、强瞬态电场等都会引起爆炸。通过微型电场传感器对静电、瞬态电场等信号进行预警,可以让人们提前采取措施,避免事故的发生。此外,微型电场传感器还可用于监测炼油厂的腐蚀状况。文献^[100]采用微型电场传感器阵列在线监测技术与定点测

厚相结合，对装置薄弱部位腐蚀情况进行实时监测，解决了炼油井腐蚀安全问题。

随着电场测量灵敏度的进一步提高，微型电场传感器将有更多应用。例如，可以实现液位、湿度的检测，也可以应用于触摸屏输入。Elesys 公司在其乘客保护系统中使用电场成像设备来检测乘客的大小和位置，用于确定是否需要弹出安全气囊，以防止乘客被安全气囊伤害。微型电场传感器还有可能用于生物医学等领域。然而，目前的微型电场传感器的性能还不能满足许多应用的需求。随着微型电场传感器性能的提高和相关技术的发展，这些应用将逐步成为可能。

3 结论

本文介绍了面向新型电力系统的微型电场传感技术的研究进展以及不同原理的微型电场传感器及相关应用场景。涉及的微型电场传感器包括基于电光效应、感应电荷、逆压电效应、静电力等原理的电场传感器。

微型电场传感器在电力系统监测、设备监测、雷电预警、航空航天、石油化工等领域具有广泛的应用价值；对于构建新型电力系统，实现电力设备与系统智能化具有重要意义。与传统的电场测量设备相比，小尺寸、高性能的新型的微型电场传感器具有诸多优势，具有很大的应用价值。同时，不同原理的微型电场传感器也各具优缺点。基于电光效应的微型电场传感器具有传输无损、分辨率高、测量频带宽、动态响应快等优点。然而，这种传感器往往具有较高的测量成本和较低的温度稳定性。基于感应电荷的 MEMS 微型电场传感器体积小、成本低、易于批量生产、集成化程度高、后端模块成熟。但这种传感器也存在耦合噪声大、频带窄、分辨率提升受限的缺点。基于逆压电效应的微型电场传感器同样具有体积小、成本低的优点，同时测量幅值范围大、功耗低。然而，压电材料与微加工工艺的不兼容限制了这类传感器的批量生产与性能的一致性。基于静电力的微型电场传感器尺寸小、成本低、易于集成、易于批量生产，且功耗很小。但传感器的机械结构限制了传感器测量的截止频率的提升。基于其他原理的微型电场传感器目前也尚不成熟。

此外，微型电场传感器的研究与发展还面临一些共同的挑战：

1) 复杂的测量环境。在实际应用过程中，电场传感器往往面临复杂的电磁环境和气象环境。面对复杂的测量环境，需要找到合适的方法来消除环境因素对测量结果的影响。在强电磁环境下，需要寻找合适的解耦方式消除电场在传感器线路中的耦合干扰。同时，还需要考虑温度、气压、湿度的变化对传感器工作特性的影响。这需要传感器选择合适的原理设计、信号处理方式及封装方式。

2) 测量频率有限。除了电光效应的微型电场传感器外，目前大多数微型电场传感器的测量频率范围较为有限，无法应用于雷电过电压及特快速暂态过电压(very-fast-transient over voltage, VFTO)等场景中。同时，受到传感原理的限制，很大一部分电场传感器无法在直流条件下应用。随着直流输电工程的不断发展和对高频电场信息的需求不断增加，必须进一步研究电场传感原理，提高电场传感器的测量频率范围，拓宽电场传感器的适用范围。

3) 集成配合与安装方式。尽管目前对于许多原理的电场传感器研究已经较为深入，在将电场传感器投入实际应用时仍然面临很多问题。构建高性能传感节点，需要将微型传感器其他模块集成，如能量采集模块、数据处理模块、通信模块等。同时，在安装电场传感器时，需要尽量减少对原始设备运行环境及可靠性的影响。解决这些问题需要在传感器原理、耦合机制、传感结构、新材料和微加工技术方面的进一步突破。同时，传感节点中的集成配合也需要能量获取方式、通信方式、数据处理算法等技术的共同进步。

随着传感技术、材料科学、先进加工技术、算法科学等学科的发展，微型电场传感器将可以获得更高的性能和更广泛的应用。我们也期待更多的相关学科研究人员加入这一研究领域。

参考文献

- [1] 安琪. 新形势下构建能源技术创新体系思路与措施[J]. 中国能源, 2020, 42(11): 40-43.
AN Qi. Policy frame and measures for constructing an energy technology innovation system under the newsituation[J]. Energy of China, 2020, 42(11): 40-43(in Chinese).
- [2] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [3] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of

- things(IoT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [4] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1274-1283.
ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1274-1283(in Chinese).
- [5] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 70-82.
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 70-82(in Chinese).
- [6] HAN Zhifei, XUE Fen, HU Jun, et al. Micro electricfield sensors: principles and applications[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2021, 15(4): 35-42.
- [7] LOCKWOOD D J, PAVESI L. Silicon fundamentals for photonics applications[M]//PAVESI L, LOCKWOOD D J. *Silicon Photonics*. Berlin: Springer, 2004: 1-50.
- [8] CHMIELAK B, WALDOW M, MATHEISEN C, et al. Pockels effect based fully integrated, strained silicon electro-optic modulator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17212-17219.
- [9] QIU Z Q, BADER S D. Surface magneto-optic Kerr effect[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1243-1255.
- [10] BULMER C H, BURNS W K, MOELLER R P. Linear interferometric waveguide modulator for electromagnetic-field detection[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(5): 176-178.
- [11] SKEATH P, BULMER C H, HISER S C, et al. Novel electrostatic mechanism in the thermal instability of z-cut LiNbO₃ interferometers[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(19): 1221-1223.
- [12] BULMER C H, BURNS W K, HISER S C. Pyroelectric effects in LiNbO₃ channel-waveguide devices[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(16): 1036-1038.
- [13] HOWERTON M M, BULMER C H, BURNS W K. Effect of intrinsic phase mismatch on linear modulator performance of the 1*2 directional coupler and Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(8): 1177-1186.
- [14] BULMER C H, BURNS W K, GREENBLATT A S. Phase tuning by laser ablation of LiNbO₃interferometric modulators to optimum linearity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(6): 510-512.
- [15] MEIER T, KOSTRZEWA K, SCHÜPPERT B, et al. Electro-optical E-field sensor with optimised electrode structure[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(14): 1327-1329.
- [16] MEIER T, KOSTRZEWA C, PETERMANN K, et al. Integrated optical E-Field probes with segmented modulator electrodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(8): 1497-1503.
- [17] SCHWERDT M, BERGER J, SCHUPPERT B, et al. Integrated optical E-field sensors with a balanced detection scheme[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1997, 39(4): 386-390.
- [18] BERGER J, POUHÈ D, MONICH G, et al. Calibration cell for E-field sensors in water environment[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(16): 1317-1318.
- [19] TAJIMA K, KOBAYASHI R, KUWABARA N, et al. Frequency bandwidth improvement of electric field sensor using optical modulator by resistively loaded element[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1998, 123(4): 25-33.
- [20] KOBAYASHI R, TAJIMA K, KUWABARA N, et al. Improvement of frequency characteristics of electric field sensor using Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electronics and Communications in Japan(Part I: Communications)*, 2000, 83(11): 76-84.
- [21] TAJIMA K, KOBAYASHI R, KUWABARA N, et al. Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10 GHz using Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, E85-C(4): 961-968.
- [22] HOWERTON M M, BULMER C H, BURNS W K. Linear 1×2 directional coupler for electromagnetic field detection [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(22): 1850-1852.
- [23] JAEGER N A F. Integrated optics pockels cell voltage sensor: US, 5029273[P]. 1991-07-02.
- [24] 曾嵘, 俞俊杰, 牛犇斌, 等. 用于宽频带时域电场测量的光电集成电场传感器[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5234-5243.
ZENG Rong, YU Junjie, NIU Benxiao, et al. Integrated optical sensors for wide band time domain electric field measurement[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5234-5243(in Chinese).
- [25] 李婵斌, 曾嵘, 沈晓丽, 等. 光电集成电场传感器介入测量影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(36): 6562-6567.
LI Chanxiao, ZENG Rong, SHEN Xiaoli, et al. Research on field distortion effects by integrated optical electric field sensor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(36): 6562-6567(in Chinese).
- [26] ZENG Rong, CHEN Weiyuan, HE Jinliang, et al. The development of integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement[C]//*Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Honolulu: IEEE, 2007: 1-5.

- [27] ZENG Rong, WANG Bo, YU Zhanqing, et al. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 312-319.
- [28] ZENG Rong, YU Junjie, WANG Bo, et al. Study of an integrated optical sensor with mono-shielding electrode for intense transient E-field measurement[J]. Measurement, 2014, 50: 356-362.
- [29] ZENG Rong, WANG Bo, YU Zhanqing, et al. Integrated optical E-field sensor based on balanced mach-zehnder interferometer[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 114404.
- [30] TAKAHASHI T, HIDAKA K, KOUNO T. New optical-waveguide pockels sensor for measuring electric fields[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(2R): 767-771.
- [31] TAKAHASHI T. Electric field measurement just beneath a surface discharge by optical-waveguide pockels sensors [J]. Electrical Engineering in Japan, 2003, 145(2): 28-34.
- [32] 谢施君, 汪海, 曾嵘, 等. 基于集成光学电场传感器的过电压测量技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2929-2935.
- XIE Shijun, WANG Hai, ZENG Rong, et al. Overvoltage measurement technique based on integrated optical electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2929-2935(in Chinese).
- [33] SIMA Wenxia, HAN Rui, YANG Qing, et al. Dual LiNbO₃ crystal-based batteryless and contactless optical transient overvoltage sensor for overhead transmission line and substation applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7323-7332.
- [34] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 8-13.
- [35] SANDERS G A, BLAKE J N, ROSE A H, et al. Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors at NxtPhase[C]//Proceedings of the 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. Portland: IEEE, 2002: 31-34.
- [36] RAHMATIAN F, CHAVEZ P P, JAEGER N A F. 138 kV and 345 kV wide-band SF₆-free optical voltage transducers[C]//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA: IEEE, 2002: 1472-1477.
- [37] LYU Fangxing, DING Hui, HAN Chunyang. Electric-field sensor based on propylene carbonate cladding microfiber sagnac loop interferometer[J/OL]. (2018-07-09) [2022-06-17]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8408548/>.
- [38] 崔勇, 漆旭平, 吴桂芳, 等. 基于悬空场磨的空间直流合成电场测量研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 343-352.
- CUI Yong, QI Xuping, WU Guifang, et al. Research on measuring space DC synthetic electric field with ungrounded rotating field-mill[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 343-352(in Chinese).
- [39] 侯杰, 吴桂芳, 崔勇, 等. 硅基微型静电谐振式直流电场传感器建模与仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 374-382.
- HOUJie, WU Guifang, CUI Yong, et al. Modeling and simulation analysis of silicon-based miniature electrostatic resonant DC electric field sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 374-382(in Chinese).
- [40] RIEHL 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.
- [41] PENG Chunrong, CHEN Xianxiang, YE Cao, et al. Design and testing of a micromechanical resonant electrostatic field sensor[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(5): 914-919.
- [42] PENG Chunrong, YANG Pengfei, GUO X, et al. Measuring atmospheric electric field using novel micromachined sensor[C]//Proceedings of the 2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Kaohsiung, China: IEEE, 2011: 417-420.
- [43] GONG Chao, TAO Hu, PENG Chunrong, et al. A novel miniature interlacing vibrating electric field sensor[C]//Proceedings of 2005 IEEE SENSORS. Irvine: IEEE, 2005: 3pp.
- [44] WIJEWEERA G, BAHREYNI B, SHAFI C, et al. Micromachined electric-field sensor to measure AC and DC fields in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 988-995.
- [45] CHEN Xianxiang, PENG Chunrong, YE Chao, et al. Thermally driven miniature electric field sensor[C]//Proceedings of the 2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Zhuhai: IEEE, 2006: 258-261.
- [46] BAHREYNI B, WIJEWEERA G, SHAFI C, et al. Analysis and design of a micromachined electric-field sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(1): 31-36.
- [47] MA Qing, HUANG Kaitian, YU Zhanqing, et al. A MEMS-based electric field sensor for measurement of high-voltage DC synthetic fields in air[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7866-7876.
- [48] MOU Ya, YU Zhanqing, HUANG Kaitian, et al. Research

- on a novel MEMS sensor for spatial DC electric field measurements in an ion flows field[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1740.
- [49] XUE Fen, HU Jun, WANG S X, et al. Electric field sensor based on piezoelectric bending effect for wide range measurement[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5730-5737.
- [50] CHENG Miaomiao, WU Jingen, GUAN Mengmeng, et al. A high-resolution electric field sensor based on piezoelectric bimorph composite[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(2): 025008.
- [51] HAN Zhifei, XUE Fen, YANG Junqing, et al. Micro piezoelectric-capacitive sensors for high-sensitivity measurement of space electric fields[C]//*Proceedings of 2019 IEEE SENSORS*. Montreal: IEEE, 2019: 1-4.
- [52] HAN Zhifei, XUE Fen, YANG Guangzhao, et al. Micro-cantilever capacitive sensor for high-resolution measurement of electric fields[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4317-4324.
- [53] XUE Fen, HU Jun, GUO Yue, et al. Piezoelectric-piezoresistive coupling MEMS sensors for measurement of electric fields of broad bandwidth and large dynamic range[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(1): 551-559.
- [54] PACHECO M, SANTOYO F M, MÉNDEZ A, et al. Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(9): 777-782.
- [55] MARTÍNEZ-LEÓN L, DIEZ A, CRUZ J L, et al. Frequency-output fiber-optic voltage sensor for high-voltage lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 996-998.
- [56] YAO Yuan, YI Benshun. FBG based voltage measurement using PZT modulation[C]//*Proceedings of 2006 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Wuhan, China: IEEE, 2006: 1-4.
- [57] ALLIL R C, WERNECK M M. Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics[J]. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2011, 60(6): 2118-2125.
- [58] DE ASSUMPCAO RIBEIRO B, WERNECK M M, DA SILVA-NETO J L. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(4): 1259-1264.
- [59] DANTE A, BACURAU R M, SPENGLER A W, et al. A temperature-independent interrogation technique for FBG sensors using monolithic multilayer piezoelectric actuators[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(11): 2476-2484.
- [60] ORR P, FUSIEK G, NIEWCZAS P, et al. Distributed optical distance protection using FBG-based voltage and current transducers[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit: IEEE, 2011: 1-5.
- [61] YANG Qing, HE Yanxiao, SUN Shangpeng, et al. An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(10): 105005.
- [62] XUE Fen, HU Jun, WANG S X, et al. In-plane longitudinal converse magnetoelectric effect in laminated composites: aiming at sensing wide range electric field[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 082901.
- [63] XUE Fen, HU Jun, WANG S X, et al. Linear control of magneto-electric effect with small electric fields[J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2016, 7: 2503205.
- [64] XUE Fen, HU Jun, WANG S X, et al. Optimum direct current magnetic bias in ferromagnetic phase for improvement of magnetoelectric effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(26): 262902.
- [65] HUANG Jing'ao, WU Xiaoming, WANG Xiaohong, et al. A novel high-sensitivity electrostatic biased electric field sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(9): 095008.
- [66] WU Xiaoming, HUANG Jing'ao. A sensitivity-enhanced electric field sensor with electrostatic field bias[C]//*Proceedings of 2017 IEEE SENSORS*. Glasgow: IEEE, 2017: 1-3.
- [67] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(1): 68-73.
- [68] CHEN T, SHAFI C, RAJAPAKSE A, et al. Micromachined AC/DC electric field sensor with modulated sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 245: 76-84.
- [69] YANG G, HU J, HAN Z, et al. Micro electric field sensor based on luminous flux sensing deformation[C]//*Proceedings of Tsinghua University-IET Electrical Engineering Academic Forum: Constructing Green and Sustainable Energy System(2021)*. Beijing: IET, 2021: 36-42.
- [70] HAN Zhifei, XUE Fen, HU Jun, et al. Trampoline-shaped micro electric-field sensor for AC/DC high electric field measurement[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2021.3131880.
- [71] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 349-367.
- YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al.

- Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367(in Chinese).
- [72] MIZUNO T, LIU Y S, SHIONOYA W, et al. Electroluminescence from surface layer of insulating polymer under ac voltage application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 903-908.
- [73] JONSSON J, RANBY B, MARY D, et al. Electroluminescence from polyolefins subjected to a homogeneous ac field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(1): 107-113.
- [74] 贾云飞, 汲胜昌, 杨欣颐, 等. 基于电致发光效应的电压传感特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5547-5556.
- JIA Yunfei, JI Shengchang, YANG Xinyi, et al. Study on voltage sensing characteristics based on electroluminescent effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5547-5556(in Chinese).
- [75] YAMASHITA H. Partial discharge measurements in dielectric liquids under impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(6): 947-955.
- [76] JIANG Jinwu, WANG Jiansheng. Joule heating and thermoelectric properties in short single-walled carbon nanotubes: electron-phonon interaction effect[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(12): 124319.
- [77] WILLIAMS K R, DE BRUYKER D P H, LIMB S J, et al. Vacuum steered-electron electric-field sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(1): 157-167.
- [78] WU Dapeng, ZHOU Chi. Fault-tolerant and scalable key management for smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 375-381.
- [79] 张保会, 郝治国, BOZhiqian. 智能电网继电保护研究的进展(一)——故障甄别新原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.
- ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. Development of relay protection for smart grid(1): new principles of fault distinction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 1-6(in Chinese).
- [80] JIANG Huaiguang, ZHANG J J, GAO Wenzhong, et al. Fault detection, identification, and location in smart grid based on data-driven computational methods[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2947-2956.
- [81] LI Depeng, AUNG Z, WILLIAMS J R, et al. Efficient authentication scheme for data aggregation in smart grid with fault tolerance and fault diagnosis[C]//Proceedings of 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Washington: IEEE, 2012: 1-8.
- [82] 朱勇, 叶妙元, 刘杰, 等. 220 kV 组合式光学电压电流互感器的设计[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 34-36.
- ZHU Yong, YE Miaoyuan, LIU Jie, et al. Design of 220 kV combined optical voltage and current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 34-36(in Chinese).
- [83] CHAVEZ P P, JAEGER N A F, RAHMATIAN F. Accurate voltage measurement by the quadrature method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 14-19.
- [84] 朱萍萍, 张贵新, 罗承沐, 等. 数值积分法在电压互感器中的应用及误差分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 919-924.
- ZHU Pingping, ZHANG Guixin, LUO Chengmu, et al. Application and error analysis of the quadrature methods in the voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 919-924(in Chinese).
- [85] 姜克儒. 基于电磁场逆问题的交流输电线路电参量反演方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- JIANG Keru. Study on electrical parameter inversion method of AC transmission line based on electromagnetic field inverse problem[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [86] 刘淮通. 用于架空输电线路电压反演的工频电场测量方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- LIU Huitong. Study on power-frequency electric field measurement method for inverse calculating voltages of overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [87] 谢雨桐. 交流架空输电线路电参量反演方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- XIE Yutong. Study on the inversion method of electrical parameter for AC overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018(in Chinese).
- [88] SI Diancheng, WANG Jingang, WEI Gang, et al. Method and experimental study of voltage measurement based on electric field integral with Gauss - Legendre algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2771-2778.
- [89] 杨杰. 基于电场逆问题的三相 D-dot 传感器设计与测量系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YANG Jie. The design of three-phase d-dot sensor based on the electric field inverse problem and the research of measurement system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [90] WANG Jingang, GAO Lu. Research on the algorithm and test of transmission line voltage measurement based on electric field integral method[J]. IEEE Access, 2018, 6: 72766-72773.
- [91] WANG Jingang, LI Xiang, OU Shucheng, et al. Research

- on transmission line voltage measurement method based on improved Gaussian integral[J]. IEEE Access, 2019, 7: 73711-73718.
- [92] 汪金刚, 颜晓军, 李想, 等. 基于一种 Gauss 型积分算法的输电线路电压测量方法与试验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 3978-3986.
- WANG Jingang, YAN Xiaojun, LIXiang, et al. Method and experimental study of transmission line voltage measurement based on a gauss-type integral algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 3978-3986(in Chinese).
- [93] 胡雪琪. 基于电场积分法的输电线电压测量方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- HU Xueqi. Voltage measurement method for transmission line based on electric field integral method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [94] 陈伟根, 张知先, 李剑, 等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 323-342.
- CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 323-342(in Chinese).
- [95] 高春嘉, 齐波, 高原, 等. 大尺寸油纸绝缘结构空间电场非接触式测量的光学传感器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4949-4957.
- GAO Chunjia, QI Bo, GAO Yuan, et al. Non-contact electro-optic sensor for space electric field in large-scale oil-pressboard insulation structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4949-4957(in Chinese).
- [96] CHEN Weigen, WANG Jianxin, WAN Fu, et al. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 271-281.
- [97] DUAN Lian, HU Jun, ZHAO Gen, et al. Method of inter-turn fault detection for next-generation smart transformers based on deep learning algorithm[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 282-291.
- [98] YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications[C]//Proceedings of 2015 IEEE SENSORS. Busan: IEEE, 2015: 1-4.
- [99] SABU S, MOHAMMED R, JOBY N. Electric field sensor for lightning early warning system[C]//Proceedings of AGU 2017 Fall Meeting. New Orleans: AGU, 2017.
- [100] 万泽贵, 程前进, 于晓鹏, 等. 电场矩阵监测技术在炼化企业中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(2): 39-41.
- WAN Zegui, CHENG Qianjin, YU Xiaopeng, et al. Application of electric field matrix monitoring technology in SINOPEC petrochemical industry[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2017, 34(2): 39-41(in Chinese).



韩志飞

在线出版日期: 2022-06-17。

收稿日期: 2022-03-14。

作者简介:

韩志飞(1996), 男, 博士生, 主要从事先进电磁场测量技术、先进传感技术、微型传感器件等方面的研究工作, hanzf18@mails.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 何金良(1966), 男, 博士, 教授, 主要从事输变电技术、电磁环境技术及电介质材料等方面的研究工作, hejl@mails.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 李婧妍)

Progress of Micro Electric Field Sensing Technology for New Power System

HAN Zhifei¹, HU Jun¹, LI Licheng², HE Jinliang^{1*}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University; 2. China Southern Power Grid)

KEYWORDS: new power system; electric field measurement; micro electric field sensor

The construction of new power system requires the establishment of information system that matches the traditional power grid. Advanced sensors are the foundation devices for connecting the physical system and information system. Among various physical quantities, electric field measurement is of great value in multiple applications. Micro electric field sensors are a new type of electric field measurement device which are small in size and low in cost. Compared with traditional electric field measurement devices, micro electric field sensors bring higher measurement performance and lower electric field distortion. Currently, micro electric field sensors are widely studied.

In this paper, different electric field sensing principles are introduced based on the existing types of micro electric field sensors. The introduced micro electric field sensors include micro electric field sensors based on electro-optic effect, MEMS micro electric field sensors based on induced charges, micro electric field sensors based on inverse piezoelectric effect, micro electric field sensors based on electrostatic force coupling, etc. The advantages and disadvantages of the electric field sensors with different principles in terms of size, cost, system complexity, frequency bandwidth, measurement range, resolution, sensitivity, linearity, power consumption, and

fabrication feasibility are also summarized.

Meanwhile, this paper also summarizes the application status and prospects of micro electric field sensors in new power system. Typical application scenarios include voltage inversion, electrical equipment condition monitoring and fault diagnosis, electromagnetic environment monitoring, etc., as shown in Fig. 1. The application scenarios cover all aspects of power generation, transmission, distribution, and electricity consumption in the power system. This paper introduces the application principles and application methods of electric field sensors in the mentioned application scenarios.

This paper introduces the micro electric field sensing technology for new power systems. The principles, advantages and disadvantages of different types of micro electric field sensors are summarized, as well as the application scenarios of micro electric field sensors in new power systems, which provide a reference for the micro electric field sensors with different principles in different applications. Micro electric field sensing technology has the advantages of small size, low cost, high performance, easy integration and mass production. It has broad application prospects in the future of new power systems.

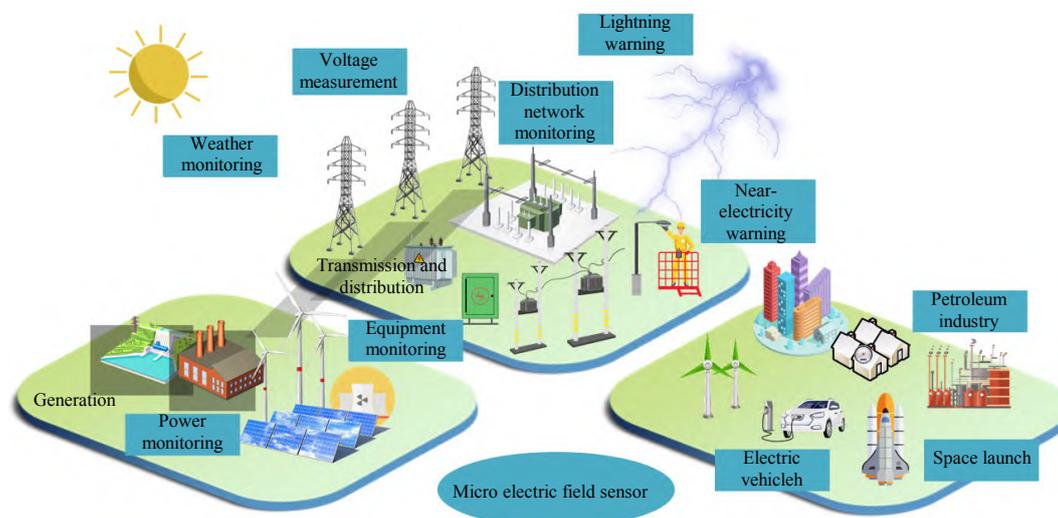


Fig. 1 Applications of micro electric field sensors