第 50 卷 第 8 期：3271-3307 高电压技术 Vol.50, No.8: 3271-3307
2024 年 8 月 31 日 High Voltage Engineering August 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240976

数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势

江俊杰[1]，胡　军[2]，马国明[3]，严英杰[1]，杨　庆[4]，杨爱军[5]，陈义强[6]，刘亚东[1]，江秀臣[1]

（1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240；2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学)，北京 100084；3. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学)，北京 102206；4. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044；5. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049；6. 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室(工业和信息化部电子第五研究所)，广州 511370）

摘　要：电力专用传感器是数字化电力装备实现可观、可测、可控的重要基础保障。该文面向新型电力系统建设目标，从数智化电网及智能传感器行业发展驱动政策出发，根据电网自身运行特性，分析了数字化电力装备电力专用传感技术的政策导向以及其在传感器小型化、多参量集成感知、一二次融合技术、可靠性与环境适应性、智能化等方面的需求。此外，该文围绕传感器敏感元件、制备技术、测试与校准、通信网络和能量收集技术，对传感器行业的现状和发展趋势进行了介绍和研判，并进一步分析了电力专用智能传感的标准建设需求，提出了未来电力专用传感技术的发展形态。

关键词：传感器；数字化；新型电力系统；电力装备；标准化

Application Requirements and Development Trend of Special Sensors in Digital Electrical Equipment

JIANG Junjie[1], HU Jun[2], MA Guoming[3], YAN Yingjie[1], YANG Qing[4], YANG Aijun[5], CHEN Yiqiang[6], LIU Yadong[1], JIANG Xiuchen[1]

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of New-generation Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 6. Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, The No.5 Electronics Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China)

Abstract: Specialized sensors for electric power are a crucial foundational element for achieving observability, measurability, and controllability in digital power equipment. To achieve the construction goals of new power system, by using the driving policies for the development of digital and intelligent grids and the smart sensor industry, we analyzed the policy guidance for specialized power sensor technology in digital power equipment based on the operational characteristics of the power grid. The analysis focuses on the demands for sensor miniaturization, multi-parameter integrated sensing, the integration of primary and secondary technologies, reliability and environmental adaptability, and intelligence. Additionally, we introduced and evaluated the current situation and development trend of sensor industry by focusing on sensor sensitive elements, preparation technology, testing and calibration, communication net-working, and energy harvesting technology. Finally we analyzed the requirements for standardization in specialized intelligent power sensors and proposed the future developmental directions for specialized power sensor technology.

Key words: sensors; digitization; new power systems; power equipment; standardization

基金资助项目：国家自然科学基金 (52207166)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207166).

0 引言

“双碳”宏观战略目标及电网数智化转型促进了新型电力系统的快速发展[1-3]。一方面，作为全球性共识，减少碳排放是应对环境气候变暖、保护生物多样性及促进经济可持续发展的关键。新能源电站作为减碳的有效手段之一，其发电量占比正持续增加[4-5]。新能源并网与交直流混联技术使得大电网、配电网、微电网及新型储能等多种电网架构形成了深度融合[6]。另一方面，人工智能、边缘计算、数字孪生、区块链以及安全防护等数字技术的应用，极大地推动了电网在智能化监测、能效优化、运维效率提升以及数据驱动决策等方面的快速革新[7-9]。然而，电网的拓扑结构复杂性、大规模新型电力装备的接入以及极端运行环境的挑战，使新型电力系统的稳定性问题愈发明显。

作为构建新型电力系统的重要举措，推动数智化坚强电网的建设将有效提升电网结构的鲁棒性。数字化电力装备将先进的传感技术和数字技术应用于电力设备的设计、制造、运行和维护等各个环节，可通过各类传感技术，将电力装备的模拟信息转变为计算机能够处理和管理的数字形式。数字化电力装备是数智化电网的基石，而传感器则是赋予数字化电力装备精确感知与智能决策能力的核心要素[10]。通过对不同电力装备部署先进传感器，可实现对电网状态的实时监测，满足电能质量分析、潜在故障预测、电源智能管理等多方面应用需求，确保电网运行的可靠性和稳定性。此外，数字化电力装备通过集成的信息获取系统，成为实时数据处理和分析的中心[11-13]，支撑智能调度、负载管理、能源优化以及应急响应等关键应用，进一步增强电网的适应性和响应能力[14-15]。

截至 2022 年，我国约有 4.8 万座变电站，输电线路和配电电路总长度分别超 80 万 km 和 400 万 km，在运行的变压器总量约为 1700 万台。随着大量电力装备的投入运行，对传感器的需求呈现爆炸性增长。预计到 2025 年，传感器的接入总量将超过 10 亿只，到 2030 年将超过 20 亿只。为促进传感器与电力装备的有效融合，加速电力装备的数字化转型升级，2022 年 8 月，工信部、财政部、商务部、国资委以及市场监管总局联印发了《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》，从宏观层面明确了电力装备数字化对于智能传感技术的需求。

智能传感器是集成了传感器、通信芯片、微处理器、驱动程序和软件算法的设备[16]，具备信息采集、处理、交换和存储功能。智能传感器主要由传感单元、处理单元和通信单元 3 部分组成。环境物理信息由传感单元采集并传输至处理单元进行数据处理与分析。经过处理后的数据再通过通信单元完成发送，实现与物联网其他设备的通信。智能传感器不仅能够感知信息，还能进行数据分析和交流，在数字化电力装备中具有广泛的应用前景[17-18]。

数字化电力装备专用传感技术通常需要从“声、热、光、电、磁、化”等多个维度实现电力装备特征信号的快速感知，采用人工智能、边缘计算等数字化技术实现电力装备状态的分析与预测，通过先进通信网络实现电力数据采集系统与主站管理控制系统的可靠连接。

对于电力装备特征信号感知，目前，声纹振动识别、红外/紫外探测、高频/超高频局部放电、容性设备介质损耗、油中溶解气体组分等监测技术在电力设备中得到了较好的推广与应用，在一定程度上提升了电力装备的态势感知能力，但仍存在信息感知能力覆盖不全面的问题。整体上，国内在新材料、新原理、新工艺等传感共性基础技术方面与国外还存在较大差距，核心精密器械和高性能复合材料还依赖进口，同时还缺乏电力传感设备性能的评估体系。

传感器算力芯片是信号数据处理的基础。电力装备的状态信息一般由部署于设备端的传感器获取后，经通信网络传输至远端信号处理与控制管理系统。这种电力数据的处理方式采用了传统的 DSP(digital signal processor)+ARM(advanced RISC machine)的处理架构，数据处理的智能化水平较低。随着人工智能技术的快速发展，算力芯片得到了前所未有的关注。2024 年，英伟达发布了全球最强“Grace Blackwell”GB200 超级芯片，可部署 1 个 27 万亿参数模型。尽管其算力可为电力大模型提供强力支持，但现阶段国外芯片存在价格高昂以及进口政策等问题。以华为、寒武纪、燧原、海光为代表的国产 GPU 算力芯片厂商将为传感器边缘计算提供经济有效的解决方案，通过将低功耗、高性能的算力芯片与传感器相结合，可实现数字化电力装备的图像、电量与非电量等大规模数据的近端处理。

电力系统通信网络采用了有线+无线的联合通信方式。其中，有线电力通信网的物理基础为 xPON 光纤，无线通信网包括以卫星、GPRS、CDMA 等

技术为主的长程无线通信以及以 ZigBee、LoRa、蓝牙等技术为主的中短程无线通信等。现阶段的电力通信技术已能满足基础的信息传输需求，但面向新型电力系统建设和数字化电力装备感知与控制需求，电力通信网络技术更需要建立相应的标准，在规约、时延、安全等方面充分保障电力数据的可靠高效交互。

综上所述，尽管当前传感器在提升电力装备数字化水平方面发挥着一定作用，但数字化电力装备传感技术的发展进入到了瓶颈阶段，电力专用传感建设细化政策缺乏、电网信息采集覆盖面不全、复杂环境下的运行可靠性难以保证、一二次设备未完全融合、自主分析能力弱、缺乏统一标准等问题仍然存在。本文将从政策推动、技术发展到标准建立，全面系统地阐述和分析当前数字化电力装备对传感技术的需求，并在此基础上展望未来电力专用传感技术的发展形态，以期为构建新型电力系统，推动数字化电力装备技术的发展提供一定的借鉴参考。

1　数字化电力装备传感政策需求

数字化电力装备传感政策旨在明确电力专用传感技术发展目标，规划电力专用传感体系的建设蓝图。政府通过制定相关政策，可以引导和推动电力行业加强传感体系发展，支持智能电网建设，鼓励电力企业加大数字化转型投入，有助于加快电力装备的数字化进程。然而，目前针对数字化电力装备的传感政策极度缺乏，与电力传感相关联的实施细则大多涵盖在智能电网、数字化电网框架政策内。

1.1　政策历程

政策历程是国家和地区对于行业和技术发展的重要体现。通过制定和调整政策，政府可以引导行业和技术的发展方向和重点，推动产业升级和技术创新。为明确数字化电力装备传感政策需求，本文将首先在智能电网建设框架下，从政策历程角度对比分析美国、欧盟、中国三方对于电力专用传感发展方向。

美国、欧盟和中国从各自国情和现实需求出发，制定了与自身相匹配的智能电网发展路线。尽管各路线在发展侧重点上有所不同，但整体上都将传感技术纳入到了智能电网的发展规划中。图 1 为美国、欧盟以及中国关于智能电网政策历程概述图。

美国智能电网政策的发展是其提高电力基础设施效率、可靠性和可持续性的更广泛战略的关键组成部分。在这些发展过程中，美国智能电网政策强调通过增加数字信息和控制技术的使用来加强电网管理和运营，提高吸收可再生能源的能力，增强电网的可靠性和安全性，以应对潜在的网络物理威胁。这些政策支持能源独立和可持续性的国家目标，利用技术进步来改变能源格局[19-21]。

欧洲智能电网政策的演变反映了对该地区日益增长的能源需求、环境问题和可再生能源整合的战略回应。欧洲智能电网政策的发展与更广泛的能源和气候目标密切相关。通过这些倡议和法规，欧洲为广泛采用智能电网技术奠定了坚实的基础，这对于管理该地区的能源转型和实现其长期气候和能源目标至关重要[22]。

在“十二五”到“十四五”的发展历程中，中国数智化电网的传感技术经历了传感器应用需求、监测预警系统构建需求、数智化运维体系建设需求 3 个阶段[23-24]。中国智能电网的概念最早在“十一五”期间被提出，其发展的特点是政府大力支持、大量投资，注重利用技术来实现经济和环境目标。随着智能电网技术的不断发展，政策要素将在我国能源的未来发挥更为重要的引导作用。

综合来看，欧美国家的智能电网技术政策在初期阶段主要侧重于通过传感技术实现电力装备状态监测，但近年来这一领域的重点已有所转移。美国目前更加强调电网的网络安全监控，政策逐渐从单纯的设备状态感知转向综合消费计量和网络安全监测；而欧洲则更加注重环境和气候问题，其电力专用传感技术发展的政策支持主要集中于可再生能源系统的监测和控制。与此同时，中国在智能电网建设的初期阶段也曾强调利用先进的传感技术来监测电力装备状态，但随着时间的推移，政策重点已从单一的设备智能传感扩展到构建电力系统的数智化运维体系。相较于美国和欧盟，中国在电力专用传感技术政策上表现出了显著的延续性和递进性。进一步来看，虽然中国已经在框架性政策文件中重点指出传感技术对于智能电网发展的重要性，但在实际应用层面，仍然缺乏对于数字化电力装备传感技术的纲领性引导文件和相关实施细则。

1.2　政策现状

1.2.1　电力传感技术发展规划

本节简要梳理了自 2015 年至今关于中国在智能电网建设过程中对传感技术发展规划的国家政策，具体见附录 A 表 A1。

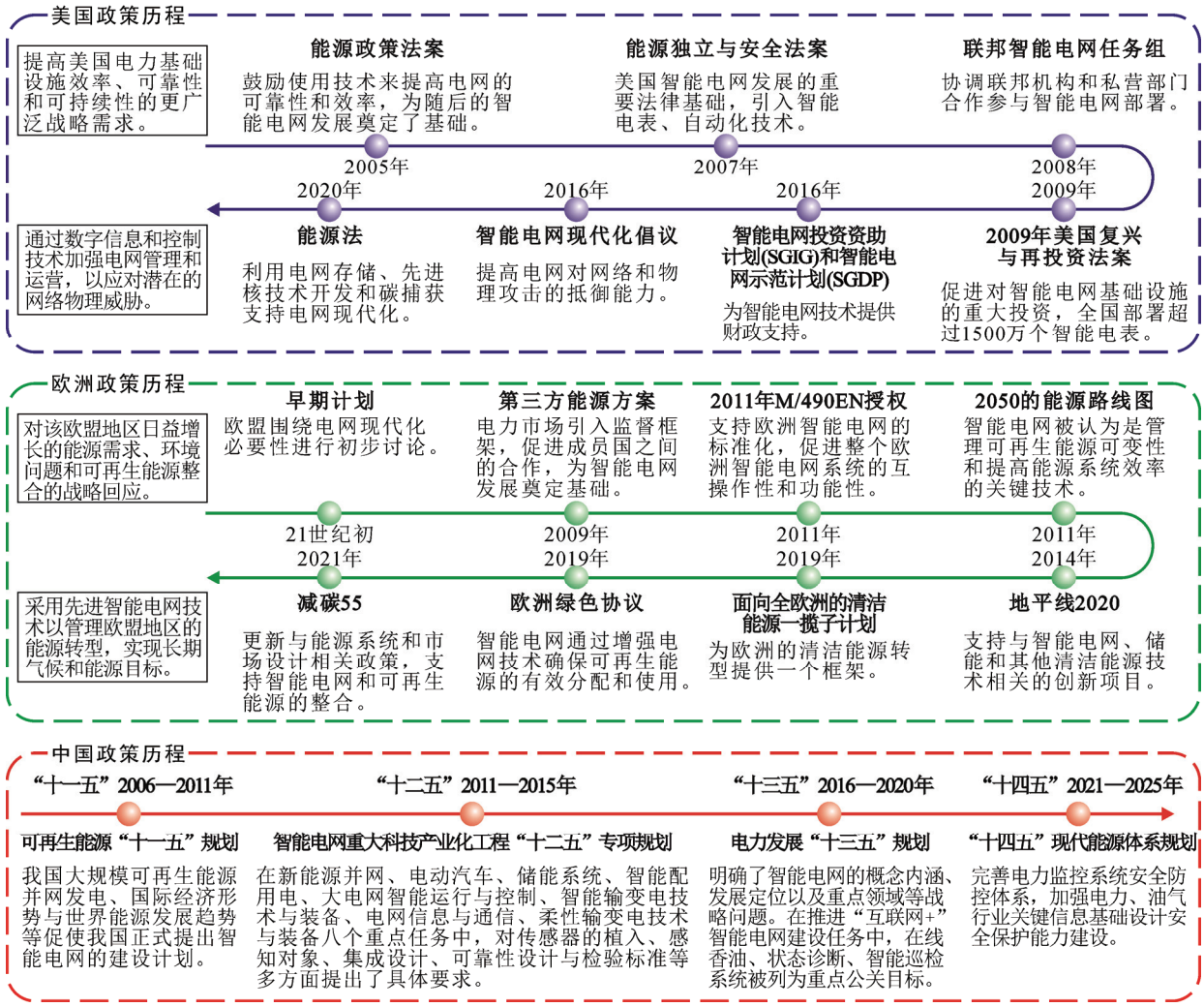


图 1 美国、欧盟以及中国关于智能电网技术发展政策历程概述图

Fig.1 Overview map of smart grid technology development policy history in the United States, the European Union and China

从政策支持角度看，智能电网建设的政策主要由国家发展和改革委员会牵头发布，国家能源局负责相关政策内容的细化实施。此外，还涉及多部门协调推动的政策文件。在梳理的政策文件中，国务院于 2015 年印发的《中国制造 2025》是智能电网建设的 1 项重要纲领性文件。该文件明确了智能电网在推动国家成为世界制造强国中的战略地位，并为后续国家部委、地方政府、电力行业的电网建设指明了发展方向。同年发布的《关于促进智能电网发展的指导意见》首次从国家层面明确了智能电网的概念，将“推广应用输变电设备状态诊断、智能巡检技术”确定为发展智能电网的主要任务之一，突出了电网智能传感的重要性。

在标准化建设方面，国家能源局在《关于加快配电网建设改造的指导意见》中提出“采用先进物联网、现代传感和信息通信技术，实现设备、通道运行状态及外部环境的在线监测，提高预警能力和信息化水平。提升设备本体智能化水平，推行功能一体化、设备模块化、接口标准化。”这一指导意见在国家提出智能电网建设战略规划后，不仅重申了传感技术的重要地位，而且从标准化建设层面对智能电网中的设备提出了具体要求，以促进数字化电力装备标准产品的广泛应用。

在产业链协同方面，通常由国家多部委联合印发相关政策，以电力系统为载体，结合智慧城市建设、“一带一路”战略规划和“互联网+”体系建设框架，发挥“产学研用”机制的作用，实现金融、交通、能源、通信等多个产业的深度融合与协同发展。《关于加快推进“一带一路”空间信息走廊建设与应用的指导意见》充分体现了在电网数智化发展中对产业链协同的高度重视。

2023 年，发改委和能源局发布的《关于加强新

形势下电力系统稳定工作的指导意见》强调了设备隐患排查治理和状态监测在提升电网自适应能力和数字化水平中的重要性。尤其是在 2024 年发布的《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》，明确了完成配电网柔性化、智能化、数字化转型的时间节点。

1.2.2　智能传感器发展规划

近年来，随着物联网和移动互联网等新兴产业的快速发展，如图 2 所示的智能传感器作为物联网、人工智能和工业互联网等新一代信息技术产业感知层的基础核心元器件，正处于快速发展阶段。国家已出台一系列政策支持智能传感器的发展，这些政策主要集中在加速推进基础理论、基础算法和装备材料等领域的研发突破与迭代应用，具体见附录表 A2。

类似于智能电网建设的政策导向，国务院发布的《中国制造 2025》也作为一项纲领性文件，为智能传感技术的发展提供了重要支持。这些政策覆盖了从传感器件的生产到工程应用、评价体系的全产业链布局。具体来说，针对传感器自身的政策涉及设计理论、新型材料、敏感单元、集成与封装技术、性能测试等多个方面，尤其在关键核心技术的攻关和新型传感技术的工程示范方面，国家相关部委发布的政策为传感行业的发展提供了明确指导。

在数智化电网建设的需求方面，智能传感行业的相关政策在电量与非电量功能性传感器响应能力、小型化、可靠性、模块化与集成化等具体方向上具有较好的适配性。然而，值得注意的是，智能传感行业的政策主要从传感器自身的角度出发，与电力应用行业的结合度相对较低。

1.3　政策需求

目前，尽管前述相关政策的实施将为数字化电力装备专用传感技术的发展提供一定的支持，但是现阶段仍然严重缺乏数字化电力装备对于传感技术的政策文件，使得数字化电力装备专用传感在技术、标准、应用架构等多方面的发展方向不够明确。

针对智能传感行业政策与应用行业结合度不高的问题，特别是在电力装备应用领域，为更好地促进数字化电力装备专用传感技术的发展，应结合应用需求来制定更具针对性的政策，包括以下方面：

1）加强智能传感器政策支持与引导

智能传感器政策制定应更加关注电力装备的具体需求和应用场景，引导智能传感器研发单位和

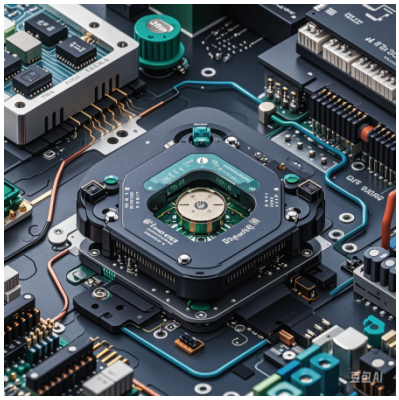


图 2　智能传感器示意图

Fig.2　Schematic diagram of intelligent sensor

人员与电力装备制造商进行技术对接，针对智能输变电装备、配电网装备、智能充电桩等电力装备以及户外、室内、真空、油浸等不同应用场景，共同开发电力装备专用智能传感器，实现传感器与电力装备的深度耦合，加速数字化电力装备的市场化应用。

2）制定细化的技术标准和规范

国家相关部门可以与行业专家合作，制定和完善数字化电力装备专用传感技术的行业标准和测试规范，包括传感器的性能指标、安全标准、数据交互协议等。这些标准将是提高产品的互操作性和安全性、促进行业健康有序发展的重要保障。

3）推动跨行业协作

鼓励传感器制造商、电力装备供应商、IT 企业和电力公司之间的合作。通过建立联盟或合作平台，共同提出满足数字化电力装备特定需求的传感技术解决方案。跨行业协作可以有效加速技术创新和应用验证，推动智能传感技术在数字化电力装备中的广泛应用。

4）设立专项研发资金和激励机制

政府可以设立专项资金支持数字化电力装备研发和试点应用，重点支持提高能源效率和电网可靠性的创新技术。同时，对采用新技术达到节能减排目标、提高电力数字化水平的企业给予税收减免或财政补贴，以激励行业采纳新技术。

5）加强研发和人才培养

投资相关的科研活动和技术开发，支持高等院校、研究机构与企业合作，培养一批懂技术、懂行业应用的复合型人才。该举措不仅有助于提升传感技术的研发水平，还能为电力行业提供技术支持和人才保障。

这些综合政策的实施，有望促进智能传感技术

在电力行业的深入应用，提高电力装备的数字化水平，从而更好地满足未来新型电力系统的发展需求。

2 数字化电力装备传感技术需求

数字化变电站是数字化电力装备的一个典型集成应用场景，其主要特征包括一次设备的智能化、二次设备的网络化、信息交互的标准化。自 2020 年以来，国网公司和南网公司逐年加大对数字化变电站的投资力度，与此同时，一系列新技术在变电站数字化建设过程中发挥了重要作用。例如，在智能运维方面，大量无人机、智能巡检机器人投入使用，使得原有人工巡检方式向无人巡检方式过渡，在增加运维人员安全性的同时，还使变电站巡检效率得到大幅度提升；在智能监测方面，通过在主变、开关室、气体绝缘组合电器设备(gas insulated switchgear，GIS)等主要设备区安装多类型传感器与监测设备，实现对环境温湿度、高频局部放电、油中溶解气体变化、铁芯接地电流的监测，同时采用新型光学电流互感器替代老旧油浸式电流互感器，引入人工智能技术，通过各监测模块，实现变电站设备可视化、隐患主动预警。

经过数年的发展，以“高清视频+无人机+机器人”为组合的巡检技术、以光纤传感、微电子机械系统(micro-electromechanical systems，MEMS)芯片传感为特色的监测技术、以 IEC61850 为框架的组网技术在变电站数字化过程中得到一定的发展与应用。然而，仍有大量的传感技术在实际应用层面存在诸多问题：

1）监测系统体积过大、难以实现全面部署

以油浸式变压器为例，目前最准确且反应最灵敏的判断依据是油中溶解气体组分含量变化[25-27]。油中溶解气体在线监测装置具有不停电检测、连续监测等优点，能及时有效发现变压器前期故障征兆，是变压器监测管理的重要手段之一。典型的商业化油中溶解气体在线监测装置数据采集终端的外形尺寸约 1.5 m×0.7 m×0.4 m，现场还需考虑取油组件及供电模块的安装，监测系统体积大，仅能在空间富余的场地完成监测设备部署，同时，对于结构紧凑的充油设备(如变压器套管等)，则存在较大的应用局限性。

2）监测参量单一，存在漏判误判的可能

除油中溶解气体在线监测技术外，现阶段针对充油设备，还包括介质损耗、油温、油压、振动等其他故障检测技术[28-31]。200 台故障变压器的调查结果显示，在不同类型的故障中，过热性故障占全部故障的 63%，其次是电弧放电、火花放电和局部放电等放电性故障[32]。由于不同类型故障引起的变压器状态量亦不相同，而现阶段变压器监测系统大部分还是对单一参量进行监测，单一参量又无法完全反应变压器的运行状态。2021 年，四川某变电站的 3 号主变 110 kV 侧 103 号油浸式电流互感器发生击穿故障，引发变压器及母线跳闸事故[33]。经调查，互感器油位正常，膨胀器未发现明显凸起，但油位观察窗因放电故障已产生裂纹。膨胀器反映了互感器内部油压变化情况，该起事故充分说明采用单一参量监测的手段极易导致漏判、误判的现象发生。

3）一二次融合程度差

长期以来电力装备本体与测控装置的生产厂商相对独立，两者间的接口兼容性差，现场的应用一般需要通过二次技改完成电力装备监测系统的部署安装。该部署方式不仅导致施工成本高、运维管理难度大、一二次设备寿命不同步等诸多问题，甚至还会引起信号串扰、雨水侵蚀、电磁免疫能力下降等现象的产生，严重影响了当前数字化电力装备要求功能一体化的发展。尽管一二次融合配电开关是当前最为成熟的一二次融合设备，但其融合能力仍存在较大的不足之处，尤其是其内部二次元器件运行寿命远远低于一次设备，接口设计也未实现完全标准化。

4）复杂运行环境下的可靠性降低问题

受高压设备复杂强电磁环境、恶劣运行工况、雷电等外部因素的影响，变压器在线监测装置容易出现传感器故障、电子箱故障、通信线路故障、工作站故障等。在线装置的维护费用占比很高，据公开报道，各类行业再维护的投入占生产总成本的 15%~70%左右，然而变压器在线监测装置在生产总成本的占比每年就接近或超过 15%。此外，发生故障的监测装置甚至可能造成对主设备状态的误判或引起设备保护误动作，进而引发电网安全生产事故。

5）智能化程度低，无法满足趋势分析与预判需求

通过对监测数据进行快速分析，获取设备运行状态与故障演化趋势对于提升电力系统智能化水平至关重要。然而，现有的变压器在线监测系统，尽管能够实现变压器运行状态监测，但却缺乏边缘计算能力，监测系统的智能化水平较低。目前，电力专用智能传感器的设计、测试、应用仍处于探索阶

段，其核心制约因素不仅在于电力应用需求的复杂性，同时与传感器多功能一体化设计、制备能力相关。除此之外，电力装备故障演化趋势评估、动作控制策略等先进算法也是数字化电力装备智能化的重要基础。

如图 3 所示，为了能快速、直接、全面且稳定地采集变压器数据并分析其运行状态，通常需要将传感器安装在电力装备的紧凑空间内，确保其与设备本体有效整合。此外，传感器还必须能够在户外的恶劣环境中工作，对变压器的温度、应变、振动和油中气体组分等多个参数进行有效监测，并能自主分析数据以评估变压器的运行状况。

面向电力特定的应用场景，针对数字化电力装备，需要重点解决电力专用传感器基础共性问题，研发自主可控的传感器件、装置及传感网络系统，突破关键技术瓶颈，推动电力传感技术朝向高精度、高可靠性、低功耗、低成本、网络化、智能化及小型化发展，以响应构建全面感知的智能电网的迫切需求。本节将详细分析数字化电力装备专用传感技术的需求。

2.1　传感器的小型化

随着我国城市化建设的不断推进，空间资源变得愈发紧张，这促使电力装备通常需要在极其有限的空间内安装和部署。为应对这一挑战，紧凑型集成化电力装备已成为未来发展的主要方向。然而，电力装备的集成度越高，其内部结构便越复杂，传统的大型传感器容易引发空间干涉，进而导致传感器存在无法安装的情况。以 GIS 为例，如图 4 所示，用于采集气室气压数据的压力密度继电器往往因设备空间干涉需要进行额外的排管处理。此外，大型传感器还面临功耗大、维护成本高的问题[34-37]。

小型化是传感器行业发展的共性趋势[34-37]。对数字化电力装备而言，这种需求显得更为迫切，具体体现在以下几方面：

1）空间限制。变压器、断路器、GIS 等电力装备的结构紧凑，内部空间有限。小型化的传感器可以更容易地安装在这些狭窄空间内，以获得更为精确的状态信息量。

2）部署灵活性。小型化传感器因体积小、重量轻，能在电网的更多位置，包括难以接触的区域进行部署，提供更全面的监控。

3）安装与维护成本。小型化传感器通常意味着更简便的安装和维护流程，从而降低现场安装、运维的人力、物力成本。

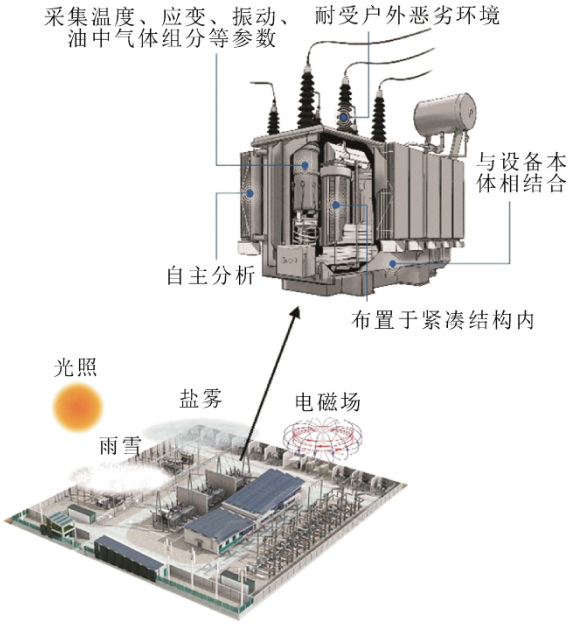


图 3　电力变压器对专用传感技术的需求概述图

Fig.3　Overview diagram of specialized sensor technology requirements for power transformers

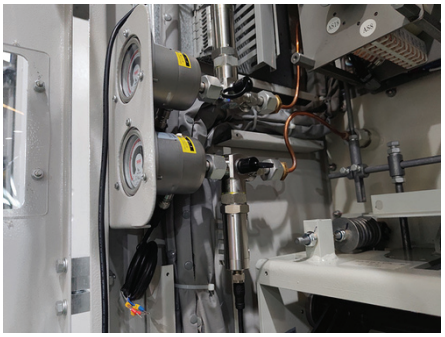


图 4　GIS 设备外接压力密度继电器

Fig.4　External pressure density relay for GIS equipment

4）能耗管理。小型化传感器的低能耗特性对于需要长时间运行的电力系统监控尤为重要，有助于降低整个系统的运营成本。

数字化电力装备对传感器小型化的需求主要源于空间限制、部署灵活性、安装与维护成本，以及能耗管理等方面的考虑。随着技术的持续进步和应用场景的不断扩展，对小型化传感器的需求将变得更为迫切和广泛。这种趋势预示着小型化传感器在未来电力装备中的角色将更加关键，对推动电力系统智能化和高效化具有重要意义。

2.2　多参量集成感知

如图 5 所示，多参量集成感知技术能够尽可能

全面且准确地捕捉电力装备的运行状态和性能，从而为电力系统的安全和稳定运行提供关键支持[34,38-39]。虽然国内外许多科研人员已就电力装备的多参量集成感知进行了广泛研究，但目前大多数所谓的集成感知技术仍主要是多个单独传感器功能的简单叠加，真正实现的多参量集成传感器也只能监测 2~4 种参数，且以温度、压力监测为主。因此，全面实现多参量集成感知的目标尚未达成，这一领域仍需深入开发和创新。

数字化电力装备对传感器多参量集成感知的需求主要体现在以下几个方面[34,38-39]：

1）增强监测能力。通过集成多种测量参数的传感器，可以更全面地监测电力装备的多种运行状态和性能指标，如温度、湿度、压力、电流、电压等，从而实现更为精确的设备状态评估和故障预测。

2）提高数据精度。集成感知技术能够在同一时间点收集多种数据，有助于提高数据的相关性和分析的准确性，进一步提升电力系统的可靠性和安全性。

3）简化系统复杂性。通过将多个传感功能整合到一个设备中，可以减少传感设备部署数量和整个电力系统的复杂性，简化安装和维护工作，降低系统的整体建设和运维成本。

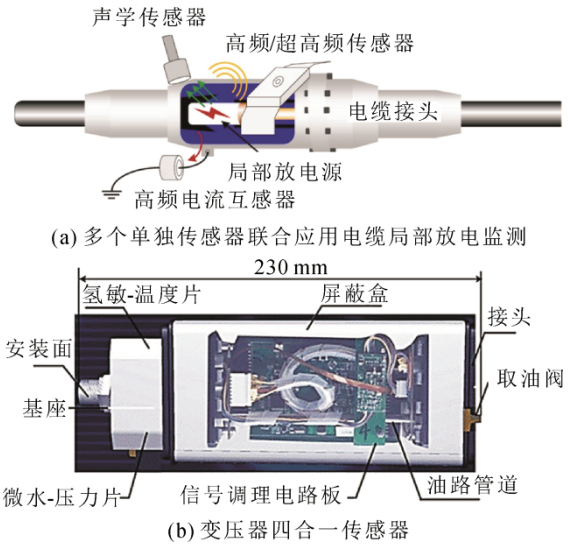
4）优化资源利用。多参量集成感知能够有效利用安装空间和设备资源，避免重复安装多个单一功能的传感器，从而优化资源配置。

5）促进智能化管理。多参量集成感知为电力装备智能化管理和远程监控提供了强大的数据支撑，有助于电网运营商实现高效和自动化的电网管理。

现代电力系统需要传感器能够同时监测多种参数，并将这些数据整合，以提供更全面的系统状态视图。这些具体需求共同推动了多参量集成感知技术在数字化电力装备中的应用和发展，为实现更高效、可靠的电力系统运营提供了关键技术支持。

2.3 一二次融合技术

为了提升电力装备的数字化和智能化水平，从根本上说，数字化电力装备需要将传感器与电力装备有效整合，实现一次和二次设备的融合[40-41]。如图 6 所示，现阶段，一二次融合设备主要应用于配电网，包括一二次融合成套的柱上开关、环网箱等，而在变电设备中，目前仅有一二次融合互感器。无论是从数量还是种类来看，当前市场上的一二次融合设备在电力装备总量中占比都极小，这表明智能化升级仍有巨大的发展空间。



(a) 多个单独传感器联合应用电缆局部放电监测

(b) 变压器四合一传感器

图 5 多参量集成感知[38-39]

Fig.5 Multi-parameter integrated sensing[38-39]


(a) 柱上开关

(b) 环网箱

(c) 光学电流互感器

图 6 一二次融合设备

Fig.6 Integrated primary and secondary equipment

数字化电力装备对传感器一二次融合技术的需求主要集中在以下几个方面[40-41]：

1）数据集成和处理能力。一二次融合技术可以将传感器数据(二次设备数据)与电力装备操作(一次设备数据)集成，从而提供更全面的数据分析和处理能力，支持高级的监测和控制功能。

2）提高系统效率和响应速度。通过融合技术，可减少数据传输的延迟，提高系统的响应速度，使电力系统能够更快地适应和响应网络条件的变化。

3）减少设备和安装成本。一二次融合技术通过整合多种功能于单一设备中，可以减少所需设备的数量，降低安装空间和成本。

4）提升系统可靠性。整合一二次设备可以简

化系统架构，减少接口问题和潜在的故障点，从而提高系统的整体可靠性。

5）支持智能化和自动化操作。一二次融合技术是实现电力系统智能化和自动化管理的关键，能够支持更复杂的数据分析和决策过程，如自动故障诊断和自愈网络。

从结构匹配角度来看，电力行业中传感器的接口标准化尚未完全实现，电力装备与传感器的一二次融合有望从根本上解决这一问题。而上述的具体需求则进一步体现了数字化电力装备在追求更高效、可靠和智能化电网运营中对一二次融合技术的依赖。

2.4　可靠性与环境适应性

传感器的可靠性定性指标通常包括故障率、可靠度及寿命。在特定环境条件下，针对电力系统应用场景，传感器的可靠性主要指其使用寿命。目前，电力装备的传感器可以分为有源和无源两类。有源传感器根据供能方式可进一步分为有线供电和无线供电。有源传感器的可靠性取决于器件本身的寿命与供能时长中的较小值。以商业化半导体和电化学气体传感器为例，通常情况下，若供能充足，半导体传感器的使用寿命可达约 10 年，而电化学传感器的寿命约为 2 年。相比之下，典型的无源传感器如光纤光栅传感器等，其寿命甚至可以超过 20 年。随着电力装备生产工艺的持续提升，以变压器为代表的电力装备，其设计使用寿命可超过 30 年，这导致现有传感器的使用寿命与电力装备本体的运行寿命之间存在显著不匹配[14,42]。

对于非特定环境，传感器的环境适应性通常涵盖多个维度，包括电磁抗扰度、温湿度变化、盐碱度、阳光辐射等。其中尤以抗电磁干扰的需求最显著。电磁干扰可分为稳态和瞬态两种，稳态电磁干扰通常由正常运行的输变电设备产生，而瞬态电磁干扰则是由雷电、开关操作及短路故障等引起。电磁干扰特征统计分析表明，现场传感器所遭受的电磁干扰峰值高、干扰信号频域宽，且随电压等级的提高而增大。如表 1 和表 2 所示，目前多数传感器的电磁抗扰度测试主要依据 GB/T 17626 和 IEC 61000-4 标准，非电量环境适应性测试标准主要依据 GB/T 2423 系列，而这些标准难以适应电力行业日益复杂的环境。随着电力装备运行环境的不断复杂化，相关标准未能及时更新修订，导致现有的电力专用传感器在环境适应性方面表现不佳，难以满足现有的应用需求，更无法应对未来新型电力系统所带来的更加复杂的环境挑战。

表 1　传感器电磁抗扰度测试依据与现场电磁骚扰工况对比

Table 1　Comparison of sensor electromagnetic immunity testing standards with on-site electromagnetic disturbance conditions

项目	电磁抗扰度测试要求	实际电磁骚扰强度	参考标准
射频电场/(μV·m^{-1})	140	215	IEC 61000-4-3
浪涌电压/kV	4	6	GB/T 17626.5，GB/T 17626.12
脉冲磁场/(A·m^{-1})	50	96	IEC 61000-4-9

表 2　传感器非电量环境测试依据与现场实际工况对比

Table 2　Comparison of sensor non-electrical parameter environmental testing standards with actual on-site conditions

项目	测试要求	实际工况	参考标准
交变湿热	高温 55℃/相对湿度 96%	温度>75 ℃/相对湿度 100%	GB/T 2423.4
盐雾	pH 值 6.5~7.2；(35±2)℃	pH 值<5.6 酸雨	GB/T 2423.17
阳光辐照强度	22.4 kW·h /m^2	33.6 kW·h /m^2	GB/T 2423.24

2.5　智能化

现阶段，电力装备的传感器主要功能局限于获取设备的状态信息量，其智能化水平普遍较低，智能传感器仅在一些新能源发电领域得到一定应用。新型电力系统要求电力装备实现可控、在控，这就要求传感器具备高度智能化，利用人工智能、边缘计算、数字加密等信息技术，将传感器获取到的信息进行处理和利用，并将结果通过网络进行加密传输，进一步提高电网的可靠性和安全性。数字化电力装备对传感器的智能化需求具体体现在以下几个关键方面[43-44]：

1）实时监测与数据分析。数字化电力装备需要传感器不仅能捕捉数据，而且能实时分析数据，以快速识别潜在的设备故障或效率降低问题。智能传感器可以通过内置的数据处理功能，对收集到的数据进行初步分析，从而即时反馈关键信息。

2）自动化与远程操作。为提高操作效率和降低人力成本，智能传感器需要支持自动化和远程监控功能。这使得操作人员能够从远程中心监控和控制电力装备的运行，甚至在需要时进行远程故障排查和维护。

3）自学习与自适应能力。随着人工智能和机器学习技术的发展，智能传感器应具备学习电网行

为和自适应调整其监测策略的能力，以优化性能并预测潜在问题。

4）数据完整性和加密。智能传感器可以采用先进的加密技术来保护电力数据的安全和完整性，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。

5）自诊断与自修复功能。未来的电力智能传感器还需要实现自我诊断和自我修复的功能，当检测到系统的异常或故障时，能够自动采取措施进行修复，从而减少人工干预。

本章以数字化变电站为例，梳理了现阶段传感技术的应用现状和存在的问题，并在此基础上，针对数字化电力装备，提出了传感技术的具体应用需求，包括：传感器的小型化，可允许在空间受限的环境中部署更多传感器，并简化安装及维护过程；多参数集成感知功能使传感器能够提供更全面和精确的设备监测，从而增强系统的分析和预测能力；一二次融合技术通过整合传感器与电力装备的功能，极大提高了数据处理效率并减少结构接口影响；在可靠性和环境适应性方面，传感器必须能在各种极端和变化的环境条件下长时间稳定运行，以确保传感器的持续可靠性；传感器智能化是推动电网数智化的主要动力，包括实时数据处理、异常检测、自动响应机制和安全性增强等方面。未来，数字化电力装备对先进传感技术的需求将日益增长，而这对于推进电网的现代化和智能化运营至关重要。

3 电力传感技术发展现状

本章面向数字化电力装备，主要介绍不同传感器的感知技术、制备技术、测试校验技术、通信组网技术以及取能技术。

3.1 感知技术

3.1.1 声学特性感知

图 7 为干涉式和表面声波两种振动传感器的技术原理图[45-46]。压电式振动传感器的敏感材料包括压电陶瓷、压电晶体、具有压电效应的高分子材料等。锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)是压电式振动传感器中应用最为广泛的材料，具有受温度影响小、机电耦合特性好的优势[47-48]。PZT 材料的压电性能好、生产成本低，但由于其含铅，尤其是在受高温影响后容易释放有毒有害气体，主要应用于 200 ℃以下的振动信号监测。目前商业化的 PZT 振动传感器响应频率可达 30 kHz，灵敏度为 10~100 mV/g[49]。相较之下，铌酸锂($LiNbO_3$)晶体振动传感器的响应频率为 150 Hz，但其温度稳定性要优于 PZT 材料，在高温工程领域具有较好的应用适配性[50]。

目前，光学式振动传感器采用的技术大致包括光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)、干涉、背向散射。大部分商业 FBG 光纤振动传感器的频响仅能达到几十到上百赫兹，整体频响能力不如压电式振动传感器[51-55]。2018 年西安交通大学提出了 1 种 FBG 振动传感器，其工作范围为 0~6000 Hz，灵敏度 0.46 pm/g，同时该 FGB 传感器还能应用于 0~100 MPa 的应力监测，相应的灵敏度为 5.94 pm/MPa[56]。光纤干涉式振动传感器又可分为 Mach-Zehnder、Michelson、Fox-Smith，Sagnac 共 4 种，华北电力大学提出的基于 Michelson 干涉原理的超声信号探测技术在 GIS 中实现了局部放电的检测，平均灵敏度达 85 dB 以上[57]；背向散射型包括 P-OTDR、B-OTDR、Φ-OTDR/C-OTDR 等[58]。

2023 年，美国中佛罗里达大学开发了工作在 4.74 GHz，3 次谐波的表面声波(surface acoustic wave, SAW)温度和应变传感器，展示了超高频 SAW 传感器的潜在用途[46]。由于局部放电产生的振动频率范围宽，将超高频 SAW 传感技术引入电力装备监测中，将进一步推动局部放电吉赫兹频段高频声振信号监测技术的发展。

对于电力装备低频振动监测，不论压电式还是

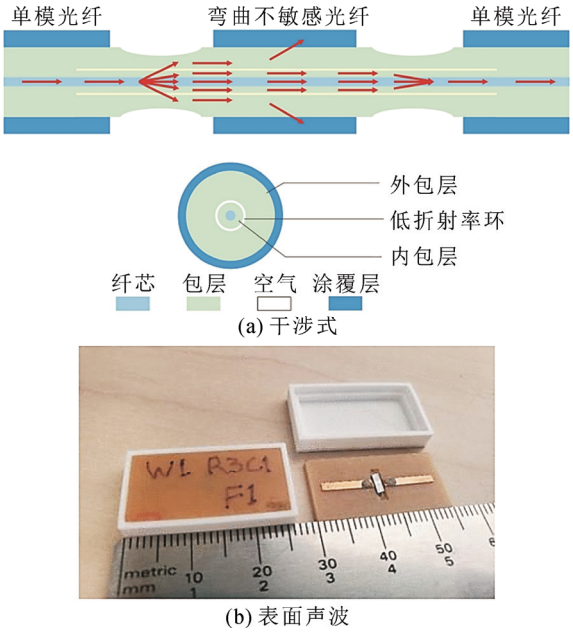


图 7 振动传感器[45-46]

Fig.7 Vibration sensor[45-46]

光学式都能较好地满足频响范围的要求，但光学式振动传感器具有更好的抗电磁干扰能力和应用前景。然而，传统光学振动传感器如 FBG 的频率响应范围主要集中于千赫兹及以下频段，低频的响应能力显然不能满足电力装备绝缘失效产生的放电现象。为推动光学振动传感器在数字化电力装备中的应用，除低频响应外，还需要重点解决弱干涉信号解调技术、温度解耦技术、解调电路非线性问题、光学信号相位差等问题，以保证光学系统能够稳定获得兆赫兹乃至吉赫兹的振动信号。表 3 对比了部分振动传感器传感性能。

3.1.2　温度特性感知

温度传感器是工业传感领域最重要的一类传感器。只要电力装备带电运行，由电流产生的焦耳热就会使得设备温度上升。电力装备的温度变化在一定程度上可以快速反映其运行状态。但由于电力装备运行状态下产生的强电磁环境使得热电偶、热敏电阻等电子式传感器难以实现现场应用，目前对于电力装备温度感知的传感技术主要以光纤传感和红外传感技术为主。图 8 为荧光光纤和瑞利光频域反射计(optical frequency domain reflectometer, OFDR)两种光纤温度传感器结构示意图。

光纤温度传感技术具有绝缘性能好、抗电磁干扰能力强、使用寿命长等诸多特点，在数字化电力装备中具有广阔的应用前景。华北电力大学马国明对此进行了详细综述[61]。光纤温度传感器主要包括荧光光纤传感器、FBG 传感器、分布式光纤传感器等。荧光光纤和 FBG 光纤温度传感器均为点式传感，只能对单点位进行温度监测，难以对如电缆、绕组等长导体的温度分布进行全面监测。基于荧光的温度传感器利用 1 根光纤来传输激发和发射信号，具有自校准的功能[62]。温度变化下荧光发射可调的特性可用于荧光温度传感器。例如，$\{[Cd(tbby)(H2O)2\cdot4(H2O)]\}_n$ 的发射强度随温度从 33.8 ℃升高到 148.8 ℃呈线性下降[63]，Cu_5 金属簇的发射强度随温度从–45 ℃升高到 80 ℃呈线性下降[64]。FBG 光纤温度传感器较成熟，在此不过多赘述。值得一提的是，长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)比传统 FBG 传感器的温度灵敏度高 1~2 个数量级[65-68]，但其测量范围仅为 25~125 ℃[69]。分布式光纤温传感器(distributed optical fiber sensor, DOFS)主要采用了拉曼背向散射光时域反射计(Raman optical time domain reflectometer, ROTDR)[70]、布里渊背向散射光时域反射计(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)[71]、布里渊背向散射光时域分析仪(Brilouin optical time domain analysis, BOTDA)[72] 以及 OFDR[73-74]。目前，基于 ROTDR 技术分布式温度传感器(distributed temperature sensor, DTS)系统商业化程度最高，而 BOTDR/BOTDA、OFDR 系统均能对温度和应变同时响应，从实际应用层面，针对单一参量监测，需要对温度应变进行解耦。

红外测量技术通常与图像识别技术相结合，可实现对电力装备与发热故障的快速诊断诊断。红外线传感器按其工作原理可分为量子型及热型两类。热型红外线传感器的特点是：灵敏度较低、响应速度较慢、响应的红外线波长范围较宽、价格较便宜，能在室温条件下工作，其典型传感器是热释电红外传感器。量子型红外传感器的特性与热型则正相反，为降低噪声一般必须在冷却条件下工作，因此其工程应用难度较高。热释电红外传感器可以与 CMOS

表 3　部分振动传感器传感性能对比

Table 3　Comparison of sensing performance of various vibration sensor

技术原理	频率响应	灵敏度
压电式(PZT)[49]	30 kHz	10~100 mV/*g*
压电式(LiNbO3)[50]	150 Hz	—
FBG[56]	6 kHz	0.46 pm/*g*
干涉式[45]	约 500 kHz	—
SAW[46]	4.74 GHz	-0.80×10^{-12}~-1.27×10^{-12}

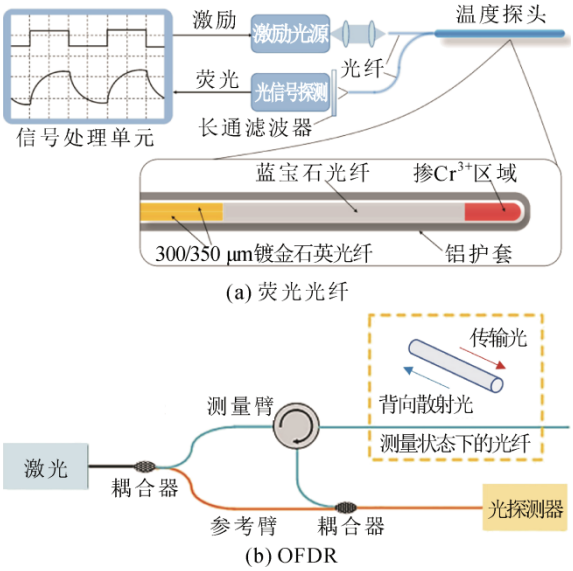


图 8　温度传感器[59-61]

Fig.8　Temperature sensors[59-61]

相结合，并采用 MEMS 工艺生产小型、低成本的红外传感芯片[75]。

温度传感器在电力装备中的应用相对较成熟，但在未来数字化电力装备中，由于大多数传感器结构、材料具有温度依赖性，为提高这些传感器的精度，温度传感器不仅将作为电力装备的热学特性感知手段，还将为其他传感器提供温度解耦功能，这就要求温度传感器具有较高的精度、抗电磁干扰能力以及较长的使用寿命。此外，温度传感器与其他传感器的集成技术也需要进行重点研究。表 4 为部分温度传感器传感性能对比表。

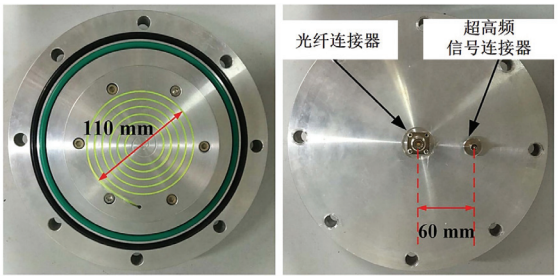
表 4 部分温度传感器传感性能对比

Table 4 Comparison of sensing performance of various temperature sensors

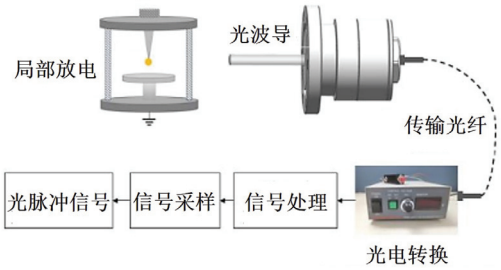
技术原理	测量范围/℃	灵敏度
荧光光纤[62]	30~250	1 ℃
LPFG[69]	25~125	0.055 nm/℃
DOFS[60, 76-78]	–269~1000	0.1 ℃

3.1.3 光学特性感知

图 9 中展示了两种 GIS 放电光学监测方法，其中光学传感器所使用的光学量敏感单元主要包括光纤、硅基光波导、光敏电阻、光电二极管等[81-83]。光纤作为光信号最常见的波导，主要用以捕获光学信号，光信号在光纤中以全反射形式传输。硅基光波导是另一种对光具有限制作用的结构，由于这种限制作用，光得以在波导结构中稳定传播。由于其脊与衬底之间的高反射率差，使得光很好地被限制在波导区域内，极大地减小了模式的有效作用面积，使得非线性得到很大的提高。光敏电阻器是利用半导体的光电导效应制成的一种电阻值随入射光的强弱而改变的电阻器，又称为光电导探测器。光电二极管的核心部分是 1 个 PN 结，为便于接受入射光照，在光电二极管的管壳上有 1 个能射入光线的窗口，窗口上镶着玻璃透镜，光线可通过透镜照射到管芯，其基本原理是当光照在二极管上时，被吸收的光能转换成电能，通过检测电信号来获取光信号的变化。



(a) 超高频光学联合监测



(b) 前置光波导监测

图 9 GIS 放电光学监测[79-80]

Fig.9 GIS discharge optical monitoring[79-80]

由于高电压设备在绝缘发生劣化后容易产生局部放电现象，电离过程中产生的光学信号可以被光学敏感器件所感知，因此光学量传感器可以用于局部放电的监测。对此，武汉大学提出了 1 种荧光光纤方法监测变压器局部放电的光学信号[84]；西安交通大学将光学传感器和超高频(ultra high frequency, UHF)相结合，通过光学传感器补偿 UHF 系统的电磁抗扰能力差的问题，实现了监测 GIS 的 200~3000 MHz 放电信号的有效监测[79,85]；上海交通大学提出一种 GIS 法兰盘面前置光波导的结构，通过光纤将 GIS 内部局部放电光信号耦合后，传输至远端进行光电转换，完成 GIS 内部局部放电监测[80,86]；华北电力大学提出了一种适用于 20~100 kHz 高灵敏度 GIS 局部放电声波检测光学传感器[87]。与其他电气量和非电量传感器相比，目前光信号传感器的应用范围相对较小，主要集中于对放电产生的光信号进行监测。

对于弱光信号而言，高性能单光子探测器如超导纳米线探测器等体现出优异的放电信号响应能力，是未来构建高性能局部放电光学信号监测系统的重要技术手段之一。但目前对于电力装备的监测应用，仍存在诸多技术亟待解决，包括单光子探测器探测效率、信号处理、环境适应性、技术成熟度与成本以及系统集成与兼容性等方面的问题。在这些问题中，探测效率是单光子探测器最为重要的技术指标。为提高传感器探测效率，需要重点关注具有高光电转换效率的钙钛矿材料和高电导率电信号传输材介质，表 5 为部分光敏传感器传感性能的对比。

3.1.4 电学特性感知

电场传感器在电力装备状态监测中的应用非

常广泛，采用的技术原理如图 10 所示，主要包括感应电荷[88]、静电力效应[89]、逆压电效应[90]、电光效应[91]等，清华大学何金良等对此进行了较为全面的综述[92]。

感应电荷效应基于导体在电场中产生感应电荷的原理，通过监测感生电荷的变化来测定空间电场的强度。一种典型的应用是场磨式电场测量仪。借助 MEMS 技术，场磨式电场测量仪可实现小型化，该技术不仅成本低廉，而且适合于大规模生产。当前，基于压电效应的场磨式电场传感器具有约 250 V/m 的分辨率和最高 2.5 kV/m 的测量能力[92]；而基于热驱动的传感器则具有 42 V/m 的分辨率，能够测量高达 5 kV/m 的电场[93]。在实际应用中，由于传感器电荷感应面积的限制，电场分辨率难以显著提高。此外，这些传感器的驱动功耗较高，其长期稳定性在机械结构上难以保证。

在基于静电力效应的电场传感器中，金属材料在电场作用下会因静电力而形变或位移。通过监测这些形变或位移，可实现对电场的精确测量。这类传感器通常利用压电效应、压阻效应或光学位移传感技术来测量结构的形变或位移。具体来说，压电式静电力电场传感器的分辨率达到 20 V/m，可测电场强度为 15.8 kV/m[89]；压阻式静电力电场传感器的分辨率为 172 V/m，最高可测电场强度高达 700 kV/m[94]；而光学式静电力电场传感器在 21.1 kV/m 的电场强度下能够提供 100 V/m 的分辨率[88]。这些基于静电力的传感器不仅尺寸小、成本低，还适合批量生产。此外，得益于静电力驱动的 2 倍频特性，这些传感器能有效分离输出电压与电场耦合噪声，从而提高信噪比。然而，传感器的截止频率通常受到其机械结构谐振频率的限制。

当施加电场时，逆压电材料的原子或分子结构会发生微小位移，导致材料宏观尺寸发生变化，该现象称为逆压电效应。按照形变检测原理，逆压电电场传感器又可分为电容式、压阻式及光学式。在电容式逆压电电场传感器中，受外电场影响，由压

表 5　部分光敏传感器传感性能对比

Table 5　Comparison of sensing performance of various photosensitive sensors

型号	最大灵敏度	带宽/kHz
PMT(H9656-02)[84]	500 nm	0~200
AE optical sensor[87]	107 dB	2~100

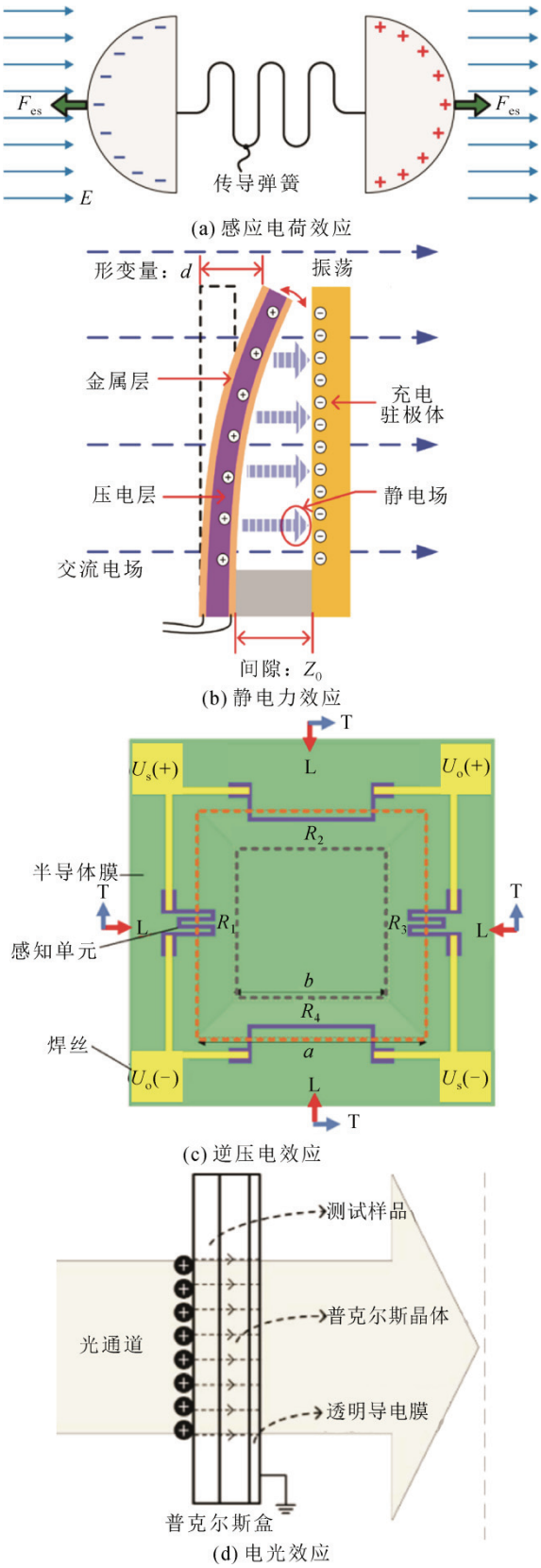


图 10　电场传感器原理示意图[88-91]

Fig.10　Schematic diagram of electric field sensor principles[88-91]

电薄膜和硅薄膜构建的压电层将发生形变并改变器件中的电容，其测量分辨率为 45 V/m，最大电场测量强度超过 1.5 MV/m[95]；压阻式逆压电电场传感器的核心是利用惠斯通电桥测量在电场作用下由于逆压电效应导致的半导体薄膜电阻变化，该类传感器分辨率为 12.7 V/m，最大可测场强为 1.57 MV/m[90]；光学式逆压电电场传感器主要采用 FBG 检测其形变量，其最大灵敏度为 1402 W/m[96-97]。

电光效应是指在某些材料中，外加电场会引起其折射率发生变化的现象。其中，线性电光效应又称 Pockels 效应，材料折射率与电场呈线性关系，该效应仅在无中心对称的晶体中存在，如磷酸二氢钾(KDP)晶体[98]；而二次电光效应则称为 Kerr 效应，其材料折射率与电场的平方成正比，该效应在所有材料中都存在，但在液体和气体中尤为显著[99]。基于电光效应的电场传感器，其最大半波电场可测强度为 100 MV/m，最小可测强度为 22 mV/m，分辨率为 0.02 V/m[92,100-103]。

相较于传统的电子式传感器，得益于光学传感器的无源特性及良好的绝缘性能以及大动态范围，基于电光效应的电场传感器将是光学电压互感器、高频局部放电监测系统的重要核心组件。但电光效应电场传感器调制解调单元功耗较大，整体应用成本较高。再者，由于电场方向和电光晶体光轴方向之间的位置关系在传感器实际测量时存在随机性，导致电光效应电场传感器即使在标定和校准后，现场应用仍会出现较大误差的问题。除此之外，受高频电场作用下的晶体折射率变化影响，探测光信号的光学参量变化同步呈现出高频特征，而这种高频变化对于光学解调系统的采样能力而言将是一大挑战。基于上述问题，面向数字化电力装备应用，需要开发 3 维电光效应电场传感器，同时对于解调系统的高速、高频采样技术提出了迫切需求。表 6 对比了部分电场传感器的性能。

表 6 部分电场传感器传感性能对比[92]

Table 6 Comparison of sensing performance of various electric field sensors[92]

技术原理	强度范围	截止频率/Hz	分辨率/(V·m^{-1})
感应电荷[93]	<5 kV/m	3.9×10^3	42
静电力效应[104]	<1 MV/m	700	17
逆压电效应[90]	<1.57 MV/m	10^5	12.7
电光效应[103, 105-106]	低场>22 mV/m	10^9	0.02
	高场<1 MV/m	10^8	500

3.1.5 磁学特性感知

磁传感器采用的技术原理包括霍尔效应[107]、巨磁电阻[108]、巨磁阻抗[109]、隧道磁电阻[110]、各向异性磁电阻[110]、超导量子效应[111]等，其示意图在图 11 中给出。

当电流垂直于外磁场通过导体时，在导体的垂直于磁场和电流方向的 2 个端面之间会出现电势差，这一现象为霍尔效应。对于霍尔效应传感器，材料的载流子迁移率决定传感器的灵敏度。目前，典型的硅基霍尔磁传感器的灵敏度为 100~1000 V/(AT)，分辨率约为 1000 nT/$\sqrt{\text{Hz}}$，偏移量约 10 mT[112-114]；为提高传感器性能，基于高电子迁移率的 GaAs、InAs 霍尔传感器的灵敏度可超过 1000 V/(AT)，分辨率为 100 nT/$\sqrt{\text{Hz}}$，偏移量仅 1 mT[115-116]；最近，石墨烯材料的应用使得霍尔磁传感器的性能进一步提高，其灵敏度可达 5700 V/(AT)，分辨率 50 nT/$\sqrt{\text{Hz}}$ [107,117-119]。

在典型的巨磁电阻(giant magnetoresistance, GMR)传感器中，2 个磁性层中的 1 个被制造成具有固定磁化方向，这 1 层被称为钉扎层或参考层。另 1 层称为自由层，它是由软磁材料制成的，在外加磁场的影响下，该层的磁化方向会发生旋转。GMR 传感器具有较高的灵敏度，甚至可探测到蛋白质和 DNA 的弱磁信号，从而进行疾病的分子诊断[120-123]。在电力应用领域，GMR 传感器通可被用于对导线中流过的电流进行非接触测量。实验结果表明，在 –5~5 A 工作范围内，传感器的灵敏度为 28 mV/A，线性度为 99.97%，最大偏差为 2.717%，在 10 kHz 电流测量时的频率响应为–1.5 dB，热补偿幅度响应的最大变化为 0.0335%/K[108]。

交流供电的铁磁导体在磁场变化时产生的大阻抗变化称为巨磁阻抗(giant magneto-impedence, GMI)效应。巨磁电阻的复阻抗由集肤效应和复磁导率共同决定。自 GMI 非晶态导线问世以来，具有带状[124]、多层薄膜[125]和具有复杂平面几何形状的多层薄膜[126]GMI 传感器依次开发出来。对于典型的 GMI 导线和带，其厚度在几十微米量级，在千赫兹到兆赫兹的频率范围内，可以实现与趋肤效应相关的较大阻抗变化。对于薄膜厚度在数百纳米量级的 GMI 传感器，其效集肤效应对应的频率可达吉赫兹范围内。无论巨磁电阻材料的结构如何变化，软磁性和磁各向异性是评估 GMI 材料的性能的 2 个重要指标[109,127]。在所有磁传感器中，GMI 传感器是唯

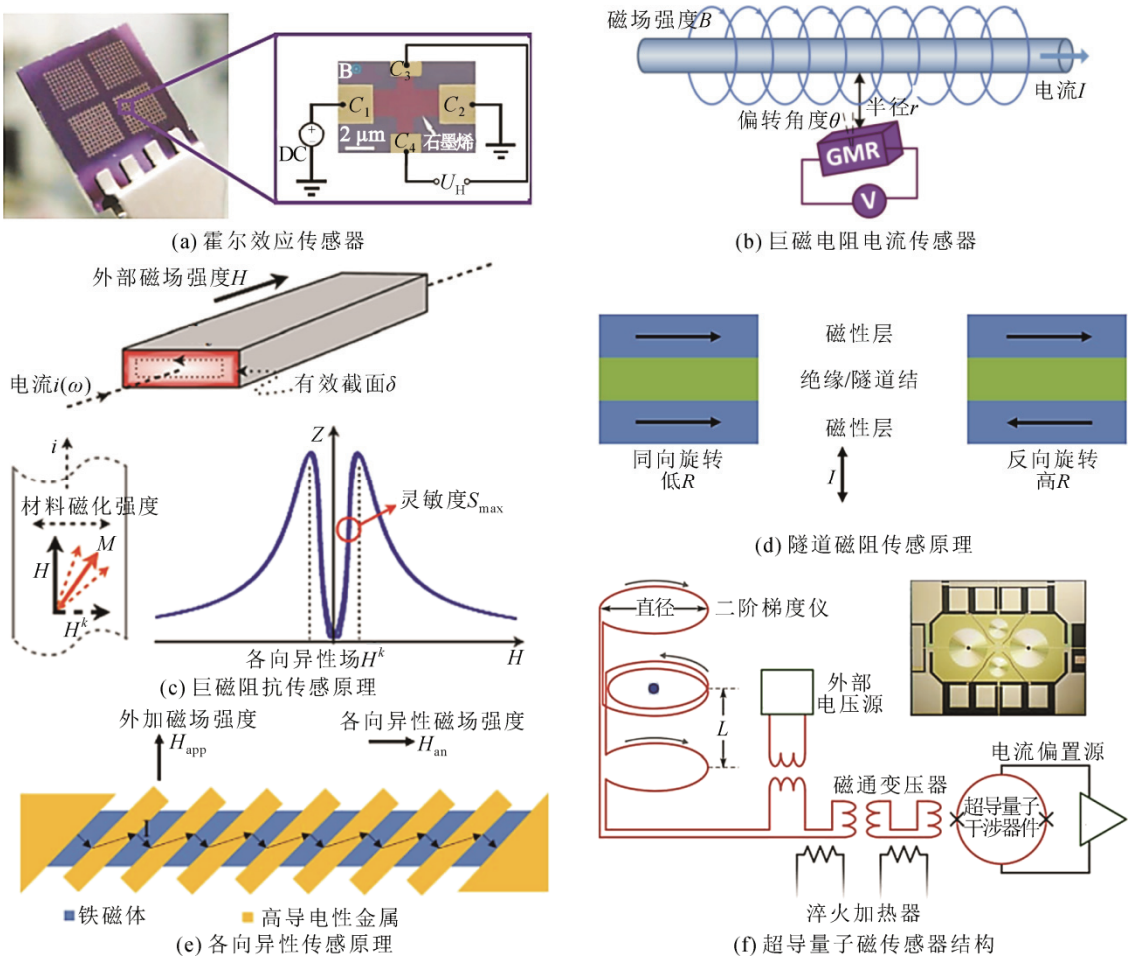


图 11　磁场传感器示意图

Fig.11　Schematic diagram of magnetic field sensors

一基于交流供电的磁传感器，因此，GMI 在射频系统中可用作无源无线传感器[128]。在弱磁场探测范围内，GMI 传感器的灵敏度要明显高于霍尔效应传感器，优于磁电阻(GMT 和 TMR)传感器，灵敏度比超导量子干涉器件(superconducting quantum interference device, SQUID)低几个数量级。从结构尺寸来看，与微米级的磁阻传感器相比，GMI 元件的尺寸通常从几毫米到亚毫米不等。目前在生物领域应用的微磁场传感器，其灵敏度可达 1 pT[129]。

隧道磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)传感器由 2 个由隧道势垒隔开的铁磁层组成，因此又称磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)。当 2 个铁磁体平行磁化时，电子隧穿绝缘层的概率比 2 个铁磁体反平行磁化时高。因此，并联配置产生最小电阻，反并联配置产生最大电阻。在典型的 TMR 传感器中，其中 1 层铁磁层随外加磁场将发生自由旋转，而另 1 层的磁化是固定的。TMR 传感器比 GMR 传感器更灵敏，但抗噪声水平较差。在相同工作电压下，TMR 比 GMR 传感器的功耗更小。此外，由于需要高质量无孔隙的极薄隧道屏障，TMR 传感器更昂贵且难以制造。由于其高灵敏度，MTJ 是非接触式电流测量的一个有吸引力的选择。利用隧道磁阻效应，清华大学报道了一种面向智能电网应用的基于 MTJ 的电流监测系统，其灵敏度为 7.75 mV/A[130]。MTJ 器件还可以被集成到传统的 CMOS ICs 中，以 1.6 mV/(V/mA)的灵敏度监测弱磁场[131]。

各向异性磁阻(anisotropic magneto resistance, AMR)材料的电阻与施加电流的方向和材料本身的磁化强度之间的夹角相关。AMR 传感器最常用的材料是坡莫合金，一种铁和镍的合金。尤其是 $Ni_{0.81}Fe_{0.19}$ 组合掺杂合金，其使 AMR 磁传感器具有低矫顽力和可忽略的磁致伸缩。台湾清华大学研发了一种可应用于磁罗盘的 AMR 磁传感器，该传感器的灵敏度为 84 μV/Oe，分辨率为 47 mOe/$Hz^{1/2}$[132]。2016 年，美国东北大学提出了一种基于 AMR 的高灵敏度柔性磁传感器，该传感器具有 150 nT 的检测

极限，并且在柔性传感器包裹后实现了出色的变形稳定性，最小弯曲半径低至 5 mm，可实现 10 μm 厚铁氧体磁性油墨图案的识别[133]。AMR 传感器的灵敏度低于 GMR 和 TMR 传感器，但 AMR 传感器也更容易制造，在器件形状和电阻方面具有灵活性，并且在低频时有更好的信噪比[134-135]。

SQUID 磁传感器由超导线和约瑟夫森结 2 种基本元件构成，具有宏观量子效应。其内部的约瑟夫森结在有稳定电压输出时会激发高频振荡，多个约瑟夫森结通过超导回路形成量子干涉机制，使得整个约瑟夫森结网络具有磁通-电压转换能力，继而实现磁场传感[136]。采用低温超导材料的干涉仪磁力计，在实验环境下的噪声水平可降至 0.3 fT/Hz$^{1/2}$，频响范围可从直流到 GHz，动态范围可达 130 dB 以上，结构尺寸仅微米量级[137-138]。

表 7 对比了不同磁场传感器的性能，SQUID 磁传感器的性能极为优异，在电力装备漏磁检测中具有可期的应用前景，但该类传感器需要突破极低温运行技术。此外，为满足高电压、强磁场的监测需求，基于法拉第磁光效应的磁场传感器已成为电力装备状态监测中的重点研究对象，具体研究包括具有高费尔德系数和低温度系数的磁光材料、光学保偏技术、光源稳定技术等。由磁光效应磁场传感器构建的光学电流互感器将是数字化电力装备的重要组成部分。

3.1.6 气体组分感知

气体组分感知技术主要面向变压器油中溶解气体和 GIS 中 SF_6 分解产物的检测，以达到获取变压器、GIS 等设备的绝缘状态信息。目前，变压器油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)技术主要采用了电学式传感器、化学式传感器以及气相色谱分析等，图 12 介绍了不同气体检测原理，包括电化学式传感器原理[139]、半导体传感器原理[140]、催化燃烧式传感器原理[141]、法布里-珀罗干涉传感器原理[142]、油色谱分析技术原理[143]、光声光谱法原理[144]。

电学传感器在检测变压器油中的特征气体时存在一定的应用局限性，无法有效检测所有气体。针对油中溶解氢气的检测，根据传感器的检测原理不同，大致可分为半导体传感器、催化燃烧式传感器和电化学式传感器等[145]。

电学传感器通常适用于检测某些特定气体，如 H_2 和 CO。H_2 作为变压器异常的主要特征气体，成为变压器故障检测中单一气体检测的首选。由于其工作原理的特性，电化学传感器需要定期校准以确保准确性。此外，在高湿度环境下，这类传感器可能会出现电池结构膨胀变形，导致电解液泄漏，进而影响传感器的稳定性和持久性[146]。半导体气体传感器通过半导体材料的电阻变化来感知气体浓度，是一种常见且具有高性价比的传感器类型。它具有响应速度快、成本低廉、体积小巧等优点，适用于多种气体的检测。催化燃烧气体传感器则通过 O_2 与可燃气体的燃烧反应来检测气体浓度，对可燃气体具有高灵敏度和高选择性。这种传感器在工业安全监测领域有重要应用，但其灵敏度可能会受到其他气体的干扰[147]。由于电学传感器在氢气检测方面非常有效，具有较高的灵敏度和选择性，因此在油中单一气体即 H_2 的检测应用中较为广泛。

表 7 部分磁场传感器传感性能对比[110]

Table 7 Comparison of sensing performance of various magnetic field sensors[110]

传感器	型号	灵敏度	分辨率/(nT·Hz$^{-1/2}$)	带宽/kHz	功耗/mW
霍尔传感器	Allegro A1326	2.5 mV/Oe	130	17	36
	石墨烯	5.7 kV/AT	50	3	—
AMR	HMC-1002	16 mV/Oe	2.7	5000	—
GMR	AAH002-02E	72.5 mV/Oe	—	75	100
GMI	MI-CB-1DH	100 kV/Oe	0.001	1	75
TMR	STJ-240	120 mV/Oe	5	5000	14.4
SQUID	—	—	3×10^{-4}	>1000	—

光学传感器分为：法布里-珀罗干涉传感器、光纤布拉格光栅传感器[148]、光声光谱传感器、光子晶体光纤传感器等。H_2 作为电热故障早期的特征故障气体，在充油设备在线监测领域受到了重点的关注。已往研究表明，钯(Pd)金属薄膜吸收氢后，其电学和光学性能将发生变化，众多学者据此并结合 MEMS 或光纤技术研究了多种氢气传感器[149-150]。光声光谱是另一种常见的气体检测技术[151-152]，但该技术容易受环境温度的干扰，对于微音器的准确性和分辨率要求较高。光子晶体光纤传感器可实现在免脱气情况下对油中乙炔的快速原位检测，是未来光纤气体检测技术的重要发展方向之一[153]。

油色谱分析技术经过几十年的发展，经历了离线油色谱和在线油色谱 2 个阶段，目前已成为变压器等大型充油设备状态监测的重要手段。传统的离线油色谱分析流程包括从充油电气设备中取油样，

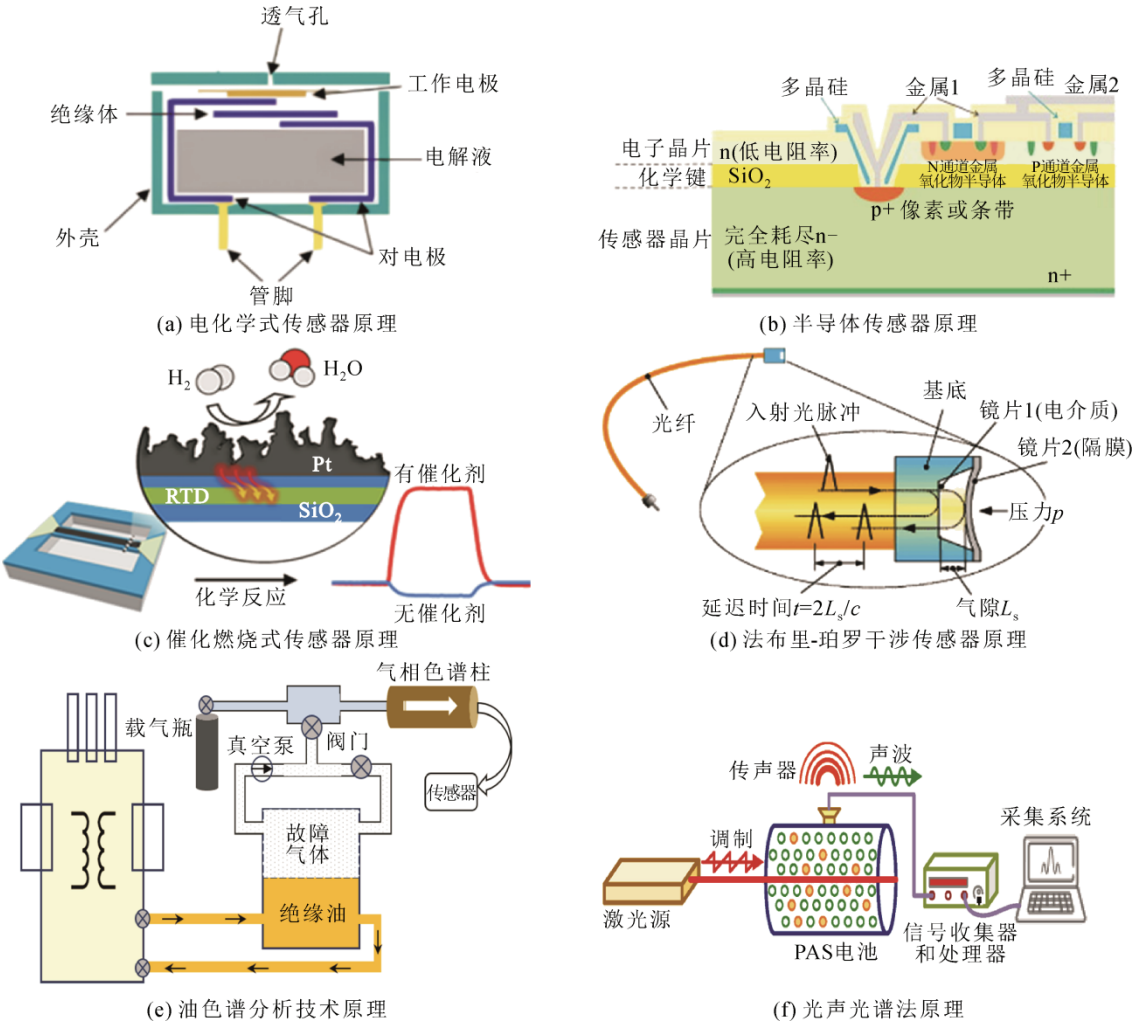


图 12　油中特征气体检测原理示意图

Fig.12　Schematic diagram of the detection principles for characteristic gases in oil

送至油化实验室进行检测。在油化实验中，油样经历样品过滤或离心、脱气和气体分析等环节。首先，通过过滤或离心确保样品中没有杂质或固体颗粒。接下来，脱气环节常采用真空脱气法、超声震荡等方法，旨在使绝缘油中的气体析出，为下一环节的气体分析奠定基础。最后，将脱出的气体引入气相色谱仪进行检测。常见的气相色谱检测器包括热导检测器(thermal conductivity detector, TCD)和火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)。由于这些检测器的局限性，它们通常在实验室环境中作为组合方法的一部分使用[154-155]。在线油色谱分析系统具有以下主要特点：首先，在线色谱系统连接了变压器的 2 个取油口，构建了油流回路，使得油样获取和循环利用变得便捷。其次，其实现了脱气和检测模块的集成化，使得油样能够在就地进行检测。

此外，SF_6 分解产物的检测是 GIS 在线监测系统中的重要检测指标之一，通过对 SF_6 气体压力的检测可以判断 GIS 设备的气密性，进而评估其绝缘性能。目前，气相色谱法、检测管法、红外光谱吸收法和光声光谱法等方法已被广泛应用于 SF_6 气体分解产物的检测。由于这些方法的检测原理与变压器油中溶解气体的检测原理相似，在此不再赘述。上述气体检测方法原理不同，基于这些原理设计的气体传感器的性能也各不相同，其具体参数，包括气体体积分数测量范围、气体浓度测量分辨率、工作温度、检测气体种类于表 8 中给出。

最近，电力装备的气体组分量子检测技术逐渐吸引了学界目光。光量子气体组分传感器，具有频谱宽(200~2000 nm)、脉宽窄(几十纳米)的特点，可以覆盖 SO_2、SOF_2、CO、H_2S、HF 等 SF_6 主要分解产物，对微量、痕量级气体灵敏度高，较已有的光学检测法(红外光谱法、光声光谱法)，其具有不脱

气、灵敏度高、受环境温度影响小的优势，可在 GIS、断路器等开关设备的 SF_6 气体检测中应用，亦可应用于变压器油中气体检测，是未来电力装备气体组分监测技术的重要发展方向之一。气体组分量子检测技术需重点解决单色量子光源、宽频扩展技术、量子探测技术、油中气体吸收特性、稳定性与一致性问题、低成本化和小型化问题等。

3.2 制备技术

以图 13 中所示电流互感器为典型应用的电力传感器，采用了传统的制备技术，包括数控机床加工、激光切割、电火花加工、焊接、黏结和螺纹连接等[161]。数控机床是制造高精度零件的关键设备，对于电流互感器中的核心部件，如铁芯和线圈骨架，需要通过数控机床进行精确加工，以确保其尺寸和形状满足设计要求。利用数控技术，可以实现对零件的复杂形状和高精度加工，提高产品的制造精度和一致性。激光切割技术主要用于制造电流互感器的线圈和其他金属部件。激光束的高能量密度可以迅速切割材料，且切割面光滑、精度高。这种方法特别适合切割复杂形状和难以用传统方法加工的材料，提高了生产效率和产品质量。对于某些难以用机械方法加工的材料或形状，电火花加工是一种有效的解决方案。其利用电火花放电时的高温来融化材料，适用于加工高硬度、高熔点或特殊形状的零件。而焊接、黏结和螺纹连接等技术则是传感器组装过程中常用的连接技术。焊接用于将不同部件牢固地连接在一起，形成稳定的结构；黏结则适用于某些不易焊接的材料或需要更灵活连接方式的场合；螺纹连接则提供了一种可拆卸的连接方式，方便后续的维修和更换。

随着数智化电网对电力传感器的小型化、集成化等需求，如图 14 所示的新型 MEMS 制备技术得到广泛关注。MEMS 加工技术，即微机械电子系统加工技术，用于制造尺度在 1 μm~1 mm 范围内的微型器件。这种加工技术具有多个显著的优越性[162]：

1）微型化。MEMS 加工技术能够制造出体积微小、重量轻的器件。MEMS 传感器尺寸通常以毫米甚至微米为计量单位，这种微型化不仅降低了能耗，而且使得机械部件具有惯性小、谐振频率高、响应时间短等优点。

2）集成度高。由于尺寸微小，多个 MEMS 器件可以集成在一个芯片上，实现多功能集成，减小整体设备的体积，提高设备的性能和效率。

表 8 部分气体检测设备气体检测性能对比[156-160]

Table 8 Comparison of gas detection performance for various gas detection methods[156-160]

检测设备	气体体积分数测量范围/10^{-6}	气体体积分数测量分辨率/10^{-6}	工作温度/℃	检测气体种类	检测周期
电化学传感器	0~1000	0.5	–20~50	H_2、CO	—
F-P 干涉传感器	5~200	0.64	–20~70	H_2	—
FBG 光栅传感器	5~200	0.477	–40~80	H_2	—
光声光谱	6~200	0.5	–20~50	H_2、CO、CH_4、C_2H_4、C_2H_2、C_2H_6、CO_2	—
油色谱分析仪	2~3000	—	5~50	H_2、CO、CH_4、C_2H_4、C_2H_2、C_2H_6、CO_2	40 min

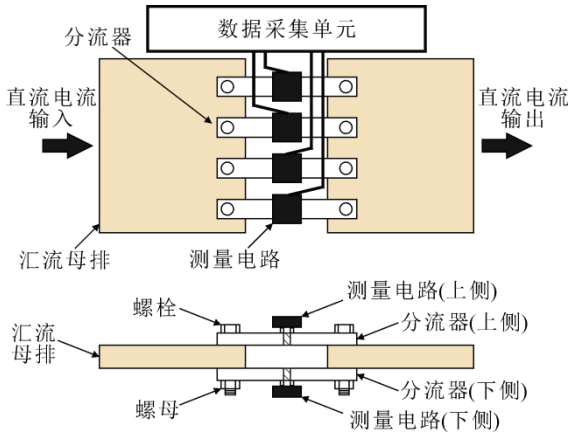


图 13 基于传统制造技术的电流传感器[161]

Fig.13 Current sensor based on traditional manufacturing technology[161]

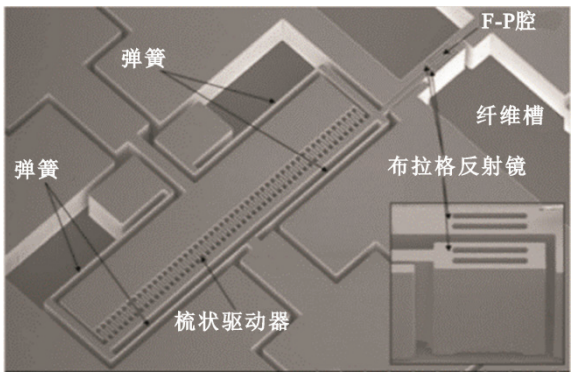


图 14 复杂的 MEMS 传感器[162]

Fig.14 Complex MEMS sensors[162]

3）智能化。结合先进的传感、控制和通信技术，MEMS 器件可以实现智能化功能，包括感知环境、处理信息并作出相应反应，从而为各种智能系

统提供核心支持。

4）高精度。MEMS 加工技术能够实现高精度的制造和加工，保证器件的性能和稳定性。

5）批量生产。使用硅微加工工艺，可以在 1 片硅片上同时切割出多个 MEMS 芯片，从而大大降低单个 MEMS 器件的生产成本。批量生产的能力使得 MEMS 传感器在商业化应用中具有显著的优势。

6）兼容性强。硅基加工工艺在很大程度上兼容传统的 IC 生产工艺，这使得 MEMS 器件可以与其他电子器件进行集成，形成完整的系统解决方案。

MEMS 加工技术在微型化、集成化、智能化、高精度、批量生产和兼容性等方面具有显著的优越性，是电力专用传感器制备技术发展趋势。MEMS 传感器通过内部的微纳米悬臂系统、微纳米板或特异性薄膜等来实现高性能靶向感知。MEMS 制造采用大批量 IC 式批量处理方法对硅衬底上的 2D 层进行二进制操作，MEMS 器件的 3D 结构则是由于许多 2D 层通过图形和中间层之间的相互作用而相互叠加而成。MEMS 制造结合了集成电路领域使用的技术和微加工工艺的能力，目前常见的微加工技术包括表面微加工，高纵横比微加工(high aspect ratio micromachining, HARM)和批量微加工等。在这些技术中，光刻、成型、晶圆键合等是决定传感芯片质量的关键重要因素。

除了传统的机械加工技术和 MEMS 加工技术，不同结构的传感器在制备技术上也有所不同。对于集成传感器，主要采用标准的硅基半导体集成电路制造工艺，通常还会将用于初步处理被测信号的部分电路集成在同一芯片上；对于薄膜传感器，通过将敏感材料的薄膜沉积在介质衬底(基板)上形成，使用混合工艺时，同样可以在基板上制造部分电路；对于厚膜传感器，使用相应材料的浆料涂覆在陶瓷基片上，基片通常由氧化铝制成，经过热处理后使厚膜成形；对于陶瓷传感器，采用标准的陶瓷工艺或其变种工艺(如溶胶-凝胶工艺)进行生产，在完成适当的预备操作后，已成形的元件在高温中进行烧结；对于点胶贴片，主要由人工操作完成，包括基座方向和高度调整、点胶、点胶检测、芯片粘贴、芯片粘贴检测、陶瓷绝缘块粘贴等工序。此外，有些传感器还采用激光微加工技术，通过圆周面激光刻蚀工艺，结合计算机技术、电子技术和精密机械技术，可应用于小型传感器敏感结构的加工与制备。

3.3　测试校验

图 15 展示了电力专用传感器测试校验需求框架。电力专用传感器的测试校验旨在确保传感器在各种电力应用场景中能够准确、可靠地获取电力装备的状态参量。目前，针对电力专用传感器的测试校验内容主要围绕静态特性、动态特性、误差分析、功能测试、稳定性、环境适应性与抗干扰性[163-166]。

在静态特性测试方面，主要考量电力专用传感

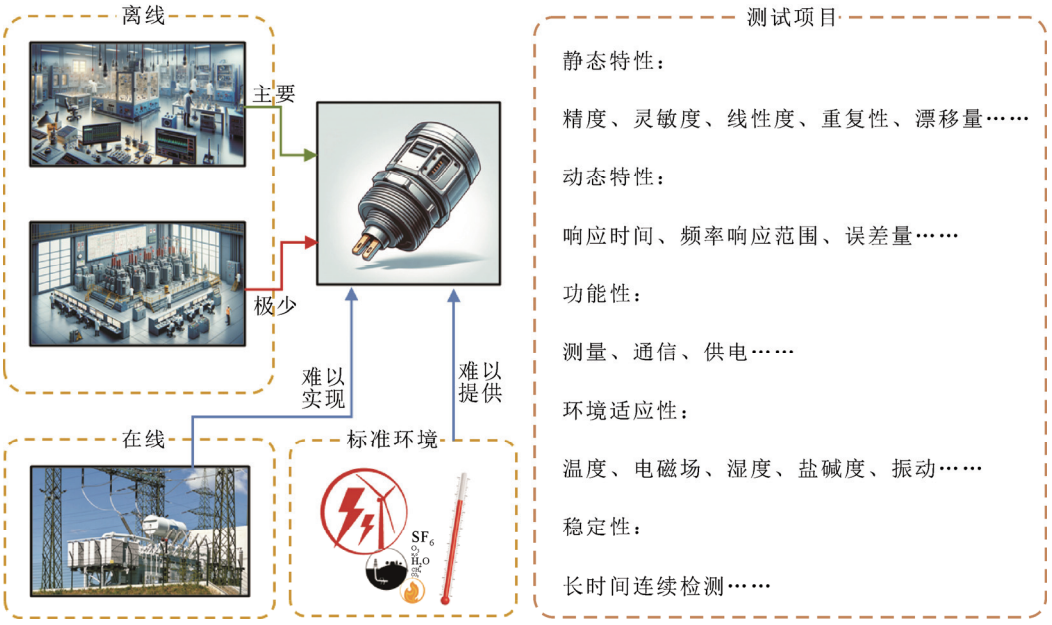


图 15　数字化电力装备专用传感器测试校验需求框架

Fig.15　Framework for testing and calibration requirements of specialized sensors for digital power equipment

器的精度、灵敏度、线性度、重复性以及漂移量；在动态特性测试方面，主要考量传感器的响应时间、频率响应范围、误差量；在功能测试方面，主要检查传感器测量、通信、供电等功能的齐备性；在稳定性测试方面，需要通过对传感器进行长时间连续检测，通过与技术参数规定要求相对比，评估传感器的长期运行稳定性；在环境适应性与抗干扰性检测方面，根据电力装备的运行工况，通过对传感器施加温度、电磁场、湿度、盐碱度、振动等环境，考核传感器能否在各种工况下依然保持正常工作。然而，目前针对电力应用的传感器测试仍然由传感器制造商根据自身对于电力应用工况的了解而开展相关试验。尽管部分试验参考了 GB/T 17626、GB/T 2423、GB/T 6587、IEC 61000 系列等标准，但现阶段的电力专用传感器仍缺乏与真实工况相对应的测试校验方法和标准，相应的测试校验平台也十分匮乏。电力应用场景是复杂的，为保障传感器对于电力装备的稳定有效监测，应当从器件、部件、系统 3 个维度对传感器开展全面的测试和校验。

器件级测试校验，也就是对传感器自身进行测试和校验。如前文所述，目前传感器制造商对于器件级测试和校验开展的工作较多。由于一二次融合技术的不断推进，传感器与电力装备主要部件的深度耦合已成为数字化电力装备的基础要素，由此带来对耦合部件开展部件级测试校验的需求。此外，实验室模拟工况很难复现电力系统的真实工况。以电磁兼容试验为例，实际现场的电磁骚扰波形可能由多种骚扰源叠加构成，而实验室内采用单一雷击、开关分合闸等单一骚扰源模拟的试验方法，其产生的电磁干扰与实际工况不完全匹配。因此当传感器在正式运行前，还需要进行与真实工况相符的系统级测试校验。

现阶段对于电力专用传感器的测试校验大多采用离线检测的方法，然而在线校验能力则是真正体现出数字化电力装备专用传感器智能化水平的重要考量指标之一。受制于运行的电力装备难以对传感器提供标准测试环境，如标准油样、气样、温湿度、酸碱度等，目前的电力传感器还无法实现在线校验。

3.4 通信组网

对于新型电力系统而言，通信组网技术是电力专用传感器与其他系统之间实现信息化、自动化、互动化的核心基础，是电力数据安全、可靠传输、储存、利用的重要保障。图 16 给出了当前电力系统通信组网主要架构。目前，针对电力系统的通信组网技术整体上可分为有线和无线技术。有线通信物理基础部署难度大、成本高，但在数据安全性和可靠性方面具有显著优势；无线传输技术物理设备部署相对容易，传感器与传感器、传感器与控制器之间的通信基本能够满足如山区、丛林、城市密集区等多场景、多地形的应用需求。若按照管理权属，通信网络又可分为电力专网和公有网络。电力专用通信网络里的运行数据携带量要大于公网通信方式，这也体现出电网公司对于电力数据安全性的要求较高。表 9 给出当前电网采用的主要组网技术。

由于电力系统通信组网技术具有显著的多样性，不同厂家提供的测控装置，其通信协议亦不相同，由此可能带来兼容性、集成性、延时性、安全性、维护性等多方面问题。在兼容性方面，由于不同厂家生产的设备和系统可能采用不同的通信协议，这可能导致设备之间无法正常通信和配合，进而影响电力系统的运行效率；在集成性方面，难以集成完整的网管系统：由于通信规约、接口等不能

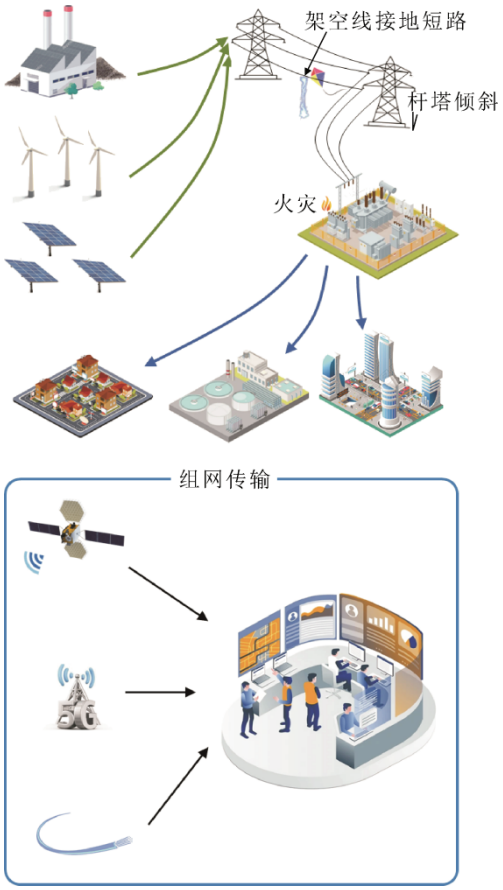


图 16 电力系统通信组网架构示意图

Fig.16 Schematic diagram of the communication network architecture in power systems

统一，网内设备、通信方式的多元化以及传输网现行体制的限制，网管系统所需的信息很难收集，难以集成一个完整的网管系统；在延时性方面，通信协议的不统一可能增加通信时延，影响电力系统的实时性和稳定性，甚至可能导致设备保护动作不及时，影响设备的安全运行；在安全性方面，也可能因为通信协议的不统一而使通信网络变得更加复杂，导致恶意攻击和信息泄露，危害电力系统的安全运行；在维护性方面，不同的协议可能需要不同的技术支持和维护手段，这将增加了系统维护的复杂性和成本。

3.5　取能技术

电力传感器的应用场景包括室内、架空线路、地下管廊、地下直埋等，相应的稳定供能系统是保证传感器正常运行的重要基础。传统的供能方式以蓄电池和有线供电为主。传感器可通过蓄电池获得运行所需电能，然而受容量限制，传感器需要频繁更换蓄电池，其稳定性无法得到保障；有线供电方式虽能提供稳定电能，但现场电源取电、布线等问题导致传感器的运维难度显著增加，使得有线供电的传感器难以得到大规模的推广应用。因此，通过先进取能技术以无线供能方式，为电力传感器提供稳定、可靠的能量来源是电力专用传感技术的研究重点之一。

现阶段，取能技术可细分为温差取能、电磁场取能、振动取能、太阳能取能、风能取能等[173-176]。温差取能主要利用了塞贝克效应、珀尔帖效应或汤姆逊效应；电磁场取能主要采用电流互感器取能、静电场取能以及涡旋电场取能；振动取能技术可采用静电效应、压电效应、法拉第电磁感应、磁致伸缩效应等；太阳能取能则是利用光生伏特原理将光能转化为电能；风能取能技术是一种利用地球大气中自然流动的空气产生的能量进行能量收集与转换的技术。表 10 主要介绍了不同取能方式及各自特性。目前，商业化的取能技术主要采用电磁感应的方式。基于电磁感应的磁场能取能技术具有耦合效果好、取能功率高的优点，同时取能装置的结构相对简单，材料较易获得，但在应用时需要重点考虑其绝缘性能的影响。

基于单一取能原理的取能装置存在取能效率低、环境适应性差等问题[183]。复合取能装置是一种具有创新性和实用性的能量收集设备，它通过结合多种能量转换机制，实现对多种环境能量的有效收集和利用。复合取能装置通常结合多种能量收集技术，如电磁感应、摩擦发电、压电效应等，通过这些技术的协同作用，实现对多种环境能量的有效收集。目前实现复合取能的技术路线主要包括：磁致伸缩材料与压电材料复合取能[184]、压电材料与电磁感应的复合取能[185-186]、纳米材料摩擦与电磁感应复合取能[187-189]、纳米材料摩擦与压电材料的复合

表 9　电力系统主要通信技术

Table 9　Major communication technologies in power systems

类型	属性	技术路线	通信能力	应用场景
有线	电力专用	光缆	长距离大容量	视频、运行数据、运维信息
	运营商公用	光缆	长距离大容量	视频
无线	电力专用	4G/5G	中短距离大容量	运行数据
	运营商	4G/5G[167]	中短距离大容量	视频、文字、图片
		GPRS[168]	长距离小容量	运行数据
		CDMA[169]	长距离小容量	运行数据
	物联网	ZigBee[170]	短距离小容量	运行数据
		LoRa[171]	中距离小容量	运行数据
		蓝牙	短距离大容量	视频、文字、图片、运行数据
		卫星[172]	超远距离小容量	文字、图片、运行数据

表 10　不同取能方式及各自特性[177-182]

Table 10　Different energy harvesting methods and their characteristics[177-182]

能量来源	技术原理	典型设备	输出功率密度	特性
温差能	塞贝克效应/珀尔帖效应/汤姆逊效应	半导体温差发电片	0.5~100 μW/cm^2	发电效率低、启动温差大、可靠性不足
电场能	静电效应/涡旋效应	电容取能片	0.1~100 μW/cm^2	取能功率小、绝缘性能差
磁场能	电磁感应	互感器	>150 μW/ cm^3	耦合效果好、取能功率高、绝缘性能差
振动能	静电效应/压电效应/电磁感应	压电发电机	2.74~300 mW/cm^3	材料易疲劳受损，长时间运行可靠性差
太阳能	光伏效应	光伏电板	0.1~20 mW/cm^2	受光照影响
风能	空气流动	风力发电机	>1 mW/cm^2	体积大、效率较低
振动/风能	纳米摩擦	纳米发电机	1~50 mW/cm^2	输出阻抗高、使用寿命短

取能[190]等。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，复合取能装置未来将在传感器稳定供能方面发挥更加重要的作用。

4 电力专用智能传感标准建设现状

电力专用智能传感技术的标准建设有助于推动数字化电力装备产业的快速发展，引导传统电网向新型电力系统的转型升级。本章将首先对现有电力专用传感标准布局情况进行分析，并在此基础上提出相应的专利建设方向建议。

4.1 电力专用传感标准布局情况

目前，传感领域作为电网的非主专业方向，其标准化问题并未引起足够的关注，感知技术标准呈现碎片化、特定化，缺乏体系性。图 17 表明，据不完全统计，目前围绕电力专用传感的技术标准大约有 135 项，其中，由 IEEE、IEC 等组织发布的国际标准、国外标准有 32 项；我国国家标准 27 项、行业标准 35 项、团体标准 18 项、地方标准 5 项、企业标准 18 项。具体地，相关标准大多围绕变电设备如电力变压器、GIS、开关柜、断路器、避雷器等应用场景建立，发电、输电、配电、用电智能传感器的技术标准相对较少；此外，对于传感器而言，主要针对电子式传感器布局了较多的标准，而针对其他传感器，如光纤传感器、微机电传感器、化学传感器等标准较少，纳米传感器、量子传感器等在电力行业内的标准几乎没有；再者，目前针对电力传感器在性能测试方面的标准较多，校验技术、安装技术、运维技术等方面的标准较少。所有标准中涉及的传感器绝大部分为传统量测设备，智能传感器应用非常少，目前仅有《数字孪生变电站智能传感器接入技术》(T/CES 160—2022)、《配电电缆接头局放和温度在线监测智能传感器技术规范》(T/CES 216—2023)这 2 个团体标准有所涉及。

综合来看，目前电力专用传感技术标准主要存在标准体系架构与电力物联网架构不匹配、标准建设不完善的问题。

1）现有标准体系架构与电力物联网架构不匹配

图 18 展示了 IEC、IEEE 以及国家电网有限公司 3 个组织所提出的标准化架构，其中 IEC 提出的智能电网标准体系架构覆盖通信、安全、规划 3 个通用领域，进而从输变配等 13 个应用领域形成了 295 项标准；IEEE 则围绕电力工程、信息技术、互通协议 3 方面发布了《智能电网标准体系》，以应用

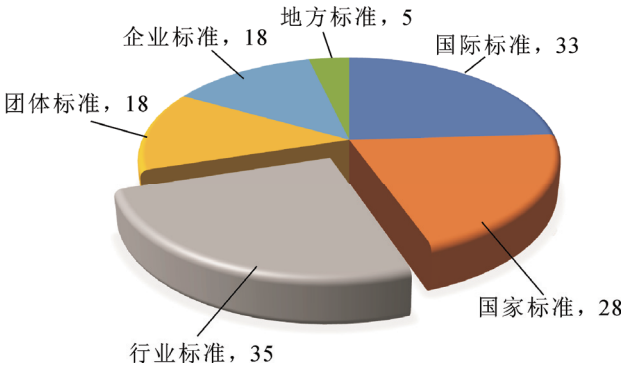


图 17 电力专用传感技术标准布局现状

Fig.17 Current layout of power-specific sensing technologies standards

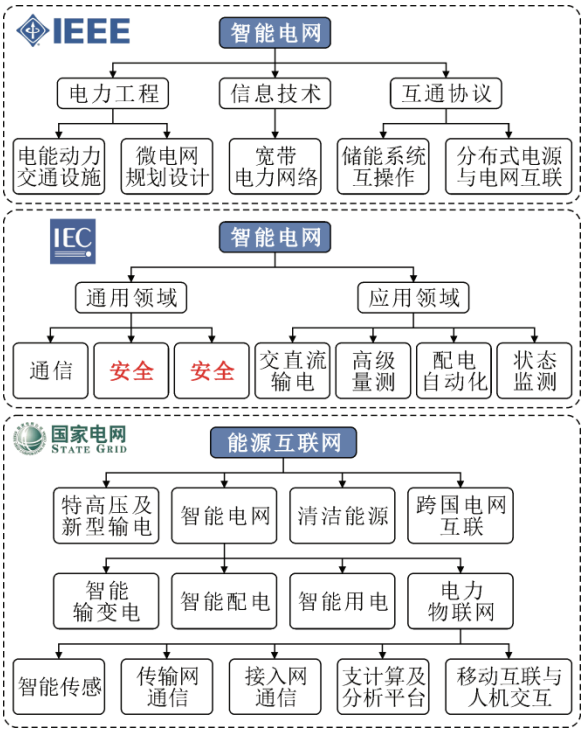


图 18 不同组织的标准体系架构

Fig.18 Standard system architectures of different organizations

为导向形成了 P2030 互操作性指南系列为核心的技术标准体系。国家电网有限公司于 2010 年编制了《智能电网技术标准体系规划》，从基础通用、规划、发输变等领域构建了智能电网技术标准体系，在基础通用中仅有信息安全、电能质量相关标准，均不涉及传感标准；国家电网有限公司于 2017 年编制了《全球能源互联网标准体系》，从特高压及新型输电、智能电网、清洁能源、跨国电网互联 4 大方向

形成了标准体系，一方面从应用场景的立足点出发将传感装置方面的标准规范嵌入到各个应用场景的标准系列中，另一方面在智能电网领域下设置了电力物联网标准体系，但侧重于通信技术标准和信息技术标准。综上，目前国内外未形成专门的传感标准体系架构，主要是将传感、通信等标准条目嵌入到各个应用领域的标准中。

2019 年以来，南网、国网陆续启动了数字电网、能源互联网建设，推进电力物联网高质量发展，作为新型电力系统的重要基础，在电力物联网架构下，将“大云物移智”等技术与电力系统相融合，打破原有的单向信息布局方式，实现计量系统设备、一次电气设备、用户智能设备的统一接入、边缘智能和共享共用，推动跨专业、内外部、上下游之间的信息互联互通和统一集成分析，有利于横向数据赋能共享与纵向数据高效流动。因此，电力物联网架构下形成横向条块化、纵向垂直化的格局，传感方式逐渐由局域量测升级为感传一体、全网互联，促使传感体系不能再遵循以应用场景为立足点的技术架构，应遵循“云-管-边-端”的电力物联网体系架构，以满足传感领域开放性、交互性、即插即用、数据安全、共享及应用等专业要求，进而相应地建立电力专用传感标准布局。

2）现有标准缺乏或不完善，无法支撑传感技术快速发展与广泛应用

目前在传感、通信、取能、边缘计算方面已有相关标准，这些存量的标准如何与物联网架构下的标准体系兼容，应当通过继承、修订、新增的方法解决存量标准不完善的问题。一方面，已有标准与现阶段电力行业的技术与应用适配性缺乏研究，通用标准的大部分指标不适用电力应用场景，不利于感知技术的推广应用。因此，需分析现有标准与实际电力需求的差距，充分考虑标准的代际兼容性，识别出哪些标准是可以继承的，哪些标准是需要结合现有应用开展修订的。另一方面，传感、取能、通信等技术的快速发展，出现了大量的新型传感器和新型业务终端，当前的标准内容已无法满足新形势下的需求，需要扩展相关技术标准。如微机电系统、分布式光纤传感、石墨烯传感、磁阻传感等新型传感技术发展为传感器在电力行业的应用打下了基础；随着物联网技术的发展及窄带物联网(NB-IoT)、增强机器类通信(eMTC)、远距离无线电(LoRa)等低功率广域通信技术的出现，本地通信网络将会出现异构化形态；电磁、振动、光照、热电等微源取能技术解决了传感器持续可靠供电问题，通过实地取能降低传感器功耗，增加传感器的续航能力，实现功率匹配可有效提升传感器可靠性。因此，需对新型传感器的原理、特点及其在电力系统内的应用形成规范化、系统化、详细化的标准导则。

综上，应当从电力物联网体系架构出发建立电力专用传感标准布局，有效指导电网数字化感知技术研发及应用；针对发输变配用等典型应用场景，研究提出系统架构、传感参量、通信方式、通信协议、信息交互模型、供电、可靠性、检测校验等方面的建设标准。

4.2　未来电力专用传感标准建设方向建议

针对未来数智化电网电力专用传感技术标准建设，本文分析了电力专用传感在 IEC、IEEE、国内的标准建设现状，如各领域已有标准、体系框架等，明晰了标准体系空白区，在此基础上，本文参考电力物联网技术标准体系，根据前文的需求分析与标准建设现状提出了未来数智化电网电力专用传感标准全景谱系与布局方向。

电力专用传感标准体系按照完整性、可扩展性、层次性、协调性、先进性的标准体系构建原则建设，如图 19 所示，整个电力专用传感标准体系分为 7 大重点建设领域，包括通用标准、共性技术标准、场景标准、应用标准、数据标准、平台标准、安全标准。

在通用标准领域，主要包括电力专用传感器相关的术语定义、未来电力传感行业的规划设计、相关体系的架构建设、电力传感器测试评估、传感设备的运行维护、全生命周期管理、低碳环保经济等。

在共性技术标准领域，主要包括以敏感元件和感知原理为核心的传感技术、高效的取能技术、基于人工智能的边缘计算能力、可互联拓展的通信组网技术、高质量品控的制备技术、可靠性与环境适应性评估技术、电力装备接口安装的部署技术等。

在场景标准领域，制定了传感器户外和室内的配置规定，尤其是在户外场景，需针对地上、地下、架空等不同场景制定相关配置规定，如室内和地下对于湿热交变、耐腐蚀性等的要求不尽相同。

在应用标准领域，主要布局 3 个方向：客户服务，以传感监测数据配合引导客户使用绿电(光伏、风能等)、优化用电(错峰用电、节约用电等)；电网运行，传感器用以监测发、输、变、配、用各环节电力装备的运行状态并研判发展趋势；综合能源，

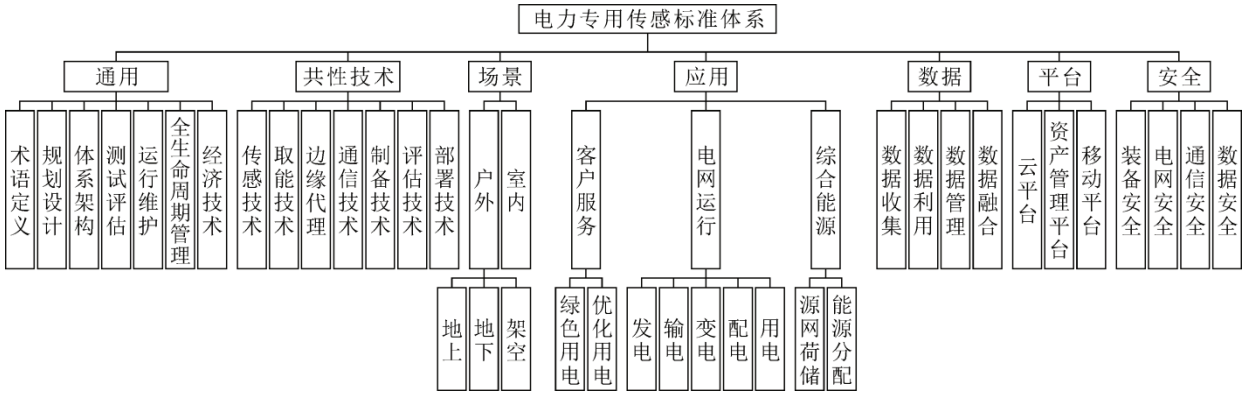


图 19 电力专用传感标准建设框架图

Fig.19 Frame diagram of standard system of sensors for electric power

基于大规模电力专用传感器的部署和状态数据，为源网荷储控制及能源分配策略提供支撑。

在数据标准领域，规定传感器数据收集方法：数据格式、日志文件等；数据利用方法：打开软件、分析软件、算法模型等；数据管理方法：存储介质、存储路径、保存时长、访问权限等；数据融合方法：多参数解耦、多装备联动评估等。

在平台标准领域，需要关注传感器云平台建设标准、基于传感器构建的电力资产管理平台标准、传感器与移动端的互联平台标准等。

在安全标准领域，依托电力专用传感器，构建电力装备安全、电网运行安全、通信技术安全、电力数据安全等多维度安全规范和标准。

根据电力专用传感技术标准化推进过程，具体实施应遵循动态更新、加速制定、宣传培训、国际化的原则，充分结合电网特殊应用场景、传感器行业技术发展、社会效益与责任开展全面细致的标准化建设工作。

5 电力传感未来形态分析

结合当下传感技术的发展现状和趋势，针对数字化电力装备的应用需求，本章将对电力传感的未来发展形态进行展望，为相关数字化技术的发展提供借鉴参考，图 20 为电力传感未来形态示意图。

从产品形态发展来看，电力专用传感器将从生产到退役实现全生命周期的标准化管理。现有传感器的设计形态如同编程范式一般，以面向过程为主，即以实现传感功能为导向对器件进行设计与研发，而未来的传感器设计形态将转变为面向对象，把传感器的功能、部署方式、应用场景当作一个整体看待，从更高层次进行系统性设计；在生产阶段，传感器将根据不同应用场景，如不同电压等级、不同电力装备等，形成标准的系列化产品，生产过程由单一定型生产转向制式化生产模式；测试校验流程是保障传感器可靠高效运行的重要考核手段，未来的传感器将从单一器件测试校验转向系统性标准化测试校验，以真实工况考核传感器的可靠性和环境适应性；在融合部署层面，现有传感器基本采用技改增设的方式实现传感器的安装，这种方式因接口不统一、部署空间受限、取能、通信等问题导致传感器难以规模化应用，随着一二次融合技术及新材料、新原理、新工艺的快速发展，未来的传感器将变得小型化、柔性化，可与一次设备的螺丝、铜导体等零件或风扇、储油罐等部件形成集成智能装置，作为电力装备的标准组件进行部署应用；在运维管理方面，未来的传感器将与电力装备实现等寿命退役，高可靠性保障了传感器的免维护性。

从功能形态发展来看，电力专用传感器将实现跨越式发展。出于低功耗、易部署、可集成的应用需求，小型化是未来传感器的共性发展趋势；柔性纳米材料与薄膜封装技术的组合应用使得传感器的结构形态将具备可塑性，能够紧密贴附于电力装备中的非常规几何部件上，突破狭小空间与结构不平整带来的传感器安装难题，使部件同时兼具环境感知和电气绝缘的能力；得益于传感器体积逐步减小，未来的传感器功耗也将进一步降低，从而提高传感器的应用经济性；现有的传感器监测能力相对较为单一，传感芯片仅能满足少量对象感知需求，而多参量集成感知是电力装备运行状态的分析与评估重要技术基础；在高可靠性上，未来的电力专用传感器将在当前 GB/T 17626、IEC 61000、GB/T 2423 等标准要求的基础上，进行更为严格的测试，以满

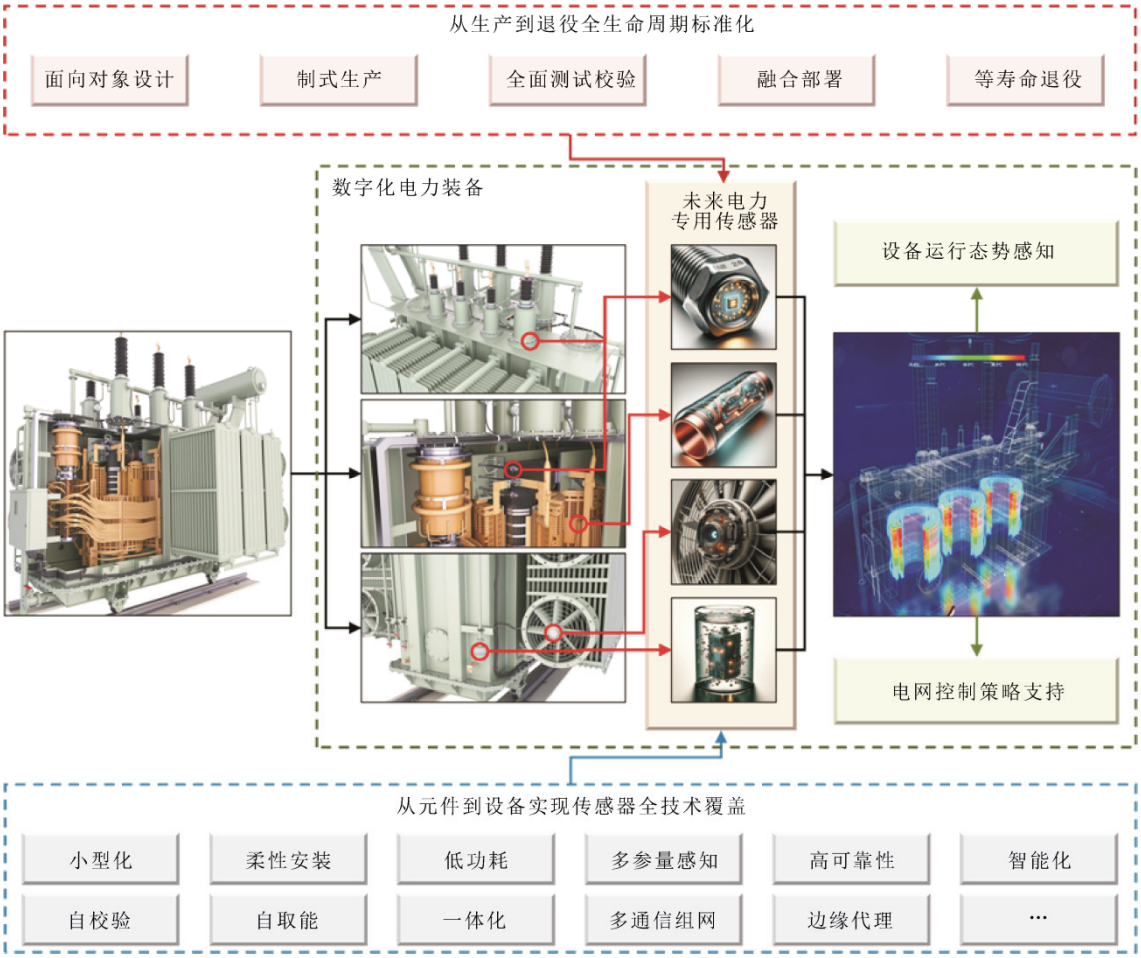


图 20　电力传感未来形态示意图

Fig.20　Schematic of the future form of sensors for electric power

足高可靠性的需求；在智能化方向上，未来传感器引入人工智能、边缘计算等数字化技术，使得传感器能够更及时地发现问题、判断问题；自校验能力则是未来传感器与现有传感器最大的技术区别之一，该技术将保障未来电力专用传感器实时具备高精度的监测能力；自取能技术体现了未来电力专用传感器的长时间运行能力，是传感器与电力装备等寿命退役的技术保障；一体化功体现了传感器与电力装备零部件结构的深度耦合能力；多通信组网能力在标准通信框架协议下，可实现多传感器之间、传感器与控制器之间信息的有效交互；边缘代理使传感器具备了自主学习、自主分析、自主判断的能力。目前在用的电力传感器多功能的集成性较差，将小型化、柔性安装、低功耗、高可靠性、智能化、自校验、自取能、一体化、多通信组网、边缘代理能力等多种技术功能汇聚于一身，实现从元件到设备层面的传感设备全技术覆盖，以满足数字电力装备对于全状态信息感知与预测的需求，并最终支撑自动化系统对电网的精准调控。

6　结论

本文从电力专用传感政策需求、数字化电力装备传感技术需求、电力传感技术发展现状、电力专用智能传感标准建设现状对电力专用传感器的应用需求与发展趋势进行了详细分析，并在此基础上提出了电力传感未来的发展形态。

1）电力专用传感技术需要针对性制定政策。目前电力传感的相关政策存在范围大、不聚焦、缺乏针对性的问题。尽管在有关智能电网建设的政策中提及了传感技术，传感产业政策中的应用场景也涉及到了电力行业，但目前缺乏针对数字化电力装备专用传感的国家政策，产业、人才、技术等方面的发展仍需针对性政策予以支持。

2）电力专用传感技术需要针对性突破发展。现有传感技术与电力行业应用需求存在一定的差距，尤其在小型化、多参量集成感知、一二次融合

技术、可靠性与环境适应性及智能化等方面的技术需求，仍需要从原理、材料、应用技术等多层面的突破和发展。

3）电力专用传感行业需要针对性建立标准。传统的传感器生产、测试、校验、应用标准无法完全匹配电力装备实际运行场景，相应的国家标准、行业标准与电力一次设备和传感器各自标准数量相去甚远，亟待提出针对性的电力专用传感标准。

综上，电力专用传感技术在构建新型电力系统、电力装备数字化转型过程中起着关键作用。未来的发展需注重标准化建设，推动跨行业协作，设立专项研发资金和激励机制，以实现技术的不断创新和应用的全面推广。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 李 鹏，习 伟，蔡田田，等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42(14)：5002-5016.
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5016.

[3] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[4] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(11)：1-25.
Project Comprehensive Report Writing Group. Comprehensive report on “China’s long-term low-carbon development strategy and transition pathways research”[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1-25.

[5] 白建华，辛颂旭，刘 俊，等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.

[6] 董新洲，汤 涌，卜广全，等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报，2019，39(11)：3107-3118.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118.

[7] BAI H, WANG Y L. Digital power grid based on digital twin: definition, structure and key technologies[J]. Energy Reports, 2022, 8(Supplement 16): 390-397.

[8] ABE R, TAOKA H, MCQUILKIN D. Digital grid: communicative electrical grids of the future[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 399-410.

[9] 王 鑫，王 霖，余 芸，等. 数字孪生电网的特性、架构及应用综述[J]. 电子与信息学报，2022，44(11)：3721-3733.
WANG Xin, WANG Lin, YU Yun, et al. Survey on characteristics, architecture and applications of digital twin power grid[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3721-3733.

[10] 盛戈皞，钱 勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[11] 江秀臣，刘亚东，傅晓飞，等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1345-1351.
JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345-1351.

[12] 刘亚东，严英杰，严 波，等. 电力装备内部状态反演重构研究框架与应用展望[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2883-2896.
LIU Yadong, YAN Yingjie, YAN Bo, et al. Framework and application prospect of internal state inversion and reconstruction of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2883-2896.

[13] 刘亚东，陈 思，丛子涵，等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.

[14] KAYASTHA N, NIYATO D, HOSSAIN E, et al. Smart grid sensor data collection, communication, and networking: a tutorial[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014, 14(11): 1055-1087.

[15] MORELLO R, DE CAPUA C, FULCO G, et al. A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: the role of advanced sensing and IoT in the electric grid of the future[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7828-7837.

[16] HUIJSING J H. Smart sensor systems: why? where? how?[C] // MEIJER G C M. Smart Sensor Systems. Chichester, UK: Wiley, 2008: 1-21.

[17] MORELLO R, MUKHOPADHYAY S C, LIU Z, et al. Advances on sensing technologies for smart cities and power grids: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7596-7610.

[18] ALONSO M, AMARIS H, ALCALA D, et al. Smart sensors for smart grid reliability[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2187.

[19] BELLANTUONO G. Comparing smart grid policies in the USA and EU[J]. Law, Innovation and Technology, 2014, 6(2): 221-264.

[20] 张 扬. 解读美国最新的智能电网政策[J]. 能源技术经济，2011，23(9)：1-5.
ZHANG Yang. Interpretation of the latest US policy on smart grid[J]. Electric Power Technologic Economics, 2011, 23(9): 1-5.

[21] LIN C C, YANG C H, SHYUA J Z. A comparison of innovation policy in the smart grid industry across the pacific: China and the USA[J]. Energy Policy, 2013, 57: 119-132.

[22] IQTIYANIILHAM N, HASANUZZAMAN M, HOSENUZZAMAN M. European smart grid prospects, policies, and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 776-790.

[23] 黄全权. 2020 年建成统一的“坚强智能电网”[J]. 国家电网，2009(6)：29.
HUANG Quanquan. Completion of a unified “strong smart grid” by 2020[J]. State Grid, 2009(6): 29.

[24] 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要(草案)》摘编[N]. 人民日报，2021-03-06(009).
Excerpts from the outline of the 14th five-year plan and the long-range objectives through the year 2035 of the People's Republic of China[N]. People's Daily, 2021-03-06(009).

[25] SUN H C, HUANG Y C, HUANG C M. A review of dissolved gas analysis in power transformers[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1220-1225.

[26] FAIZ J, SOLEIMANI M. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1239-1248.

[27] DE FARIA JR H, COSTA J G S, OLIVAS J L M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 46: 201-209.

[28] MAINA R, TUMIATTI V, POMPILI M, et al. Dielectric loss characteristics of copper-contaminated transformer oils[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1673-1677.

[29] CHU D, LUX A. On-line monitoring of power transformers and components: a review of key parameters[C]//Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. Cincinnati, USA: IEEE, 1999: 669-675.

[30] YAN C G, XU C, LIU H, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.

[31] 杜厚贤，刘　昊，雷龙武，等. 基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J]. 电工技术学报，2023，38(1)：83-94.
DU Houxian, LIU Hao, LEI Longwu, et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 83-94.

[32] 马　颢. 针对多源数据的变压器状态评估方法研究[D]. 济南：山东大学，2023.
MA Hao. Research on transformer condition evaluation method based on multi-source data[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2023.

[33] 刘圆方，国金明，陆晓彬，等. 一起 110 kV 电流互感器跳闸事故原因分析[J]. 四川电力技术，2023，46(4)：91-94.
LIU Yuanfang, GUO Jinming, LU Xiaobin, et al. Cause analysis of a 110 kV current transformer tripping accident[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(4): 91-94.

[34] SUN H Y, HUANG S L, PENG L S. High-current sensing technology for transparent power grids: a review[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 326-358.

[35] 訾振宁，何永君，赵东元，等. 新一代电力系统灵活柔性特征研究[J]. 电气工程学报，2019，14(3)：1-8.
ZI Zhenning, HE Yongjun, ZHAO Dongyuan, et al. Research on flexibility of new generation power system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 1-8.

[36] BURYANINA N S, KOROLUK Y F, TIMOFEEVA A M V. 35~200 kV compact transmission lines with improved power transfer capability[C]//2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, Russia: IEEE, 2020: 1-5.

[37] LIPS P. Compact HVDC converter station design considerations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(3): 894-902.

[38] SONG Y X, CHEN W G, WAN F, et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 210: 108140.

[39] ZHANG L, SUN L, WANG W S, et al. Intelligent monitoring of EHV transformer bushing based on multi-parameter composite sensing technology[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2023, 17(9): 373-384.

[40] CAI Y M, LI H L. Equipment integration technology research for smart distribution grid[C]//2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, China: IEEE, 2014: 347-349.

[41] SONG Q P, SHENG W X, KOU L F, et al. Smart substation integration technology and its application in distribution power grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 31-36.

[42] HOMMEL M, KNAB H, YOUSEF S G. Reliability of automotive and consumer MEMS sensors-an overview[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126: 114252.

[43] FENG S B, FARHA F, LI Q J, et al. Review on smart gas sensing technology[J]. Sensors, 2019, 19(17): 3760.

[44] LIU J M, ZHAO Z Y, JI J, et al. Research and application of wireless sensor network technology in power transmission and distribution system[J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(2): 199-220.

[45] XU Y P, LU P, QIN Z G, et al. Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3031-3042.

[46] OTERO M J M, MALOCHA D C. 4.74 GHz harmonically operated SAW temperature and strain sensors[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2023, 7: 379-389.

[47] ALBARBAR A, BADRI A, SINHA J K, et al. Performance evaluation of MEMS accelerometers[J]. Measurement, 2009, 42(5): 790-795.

[48] 吴金根，高翔宇，陈建国，等. 高温压电材料、器件与应用[J]. 物理学报，2018，67(20)：207701.
WU Jingen, GAO Xiangyu, CHEN Jianguo, et al. Review of high temperature piezoelectric materials, devices, and applications[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 207701.

[49] XU S Y, XING F F, WANG R L, et al. Vibration sensor for the health monitoring of the large rotating machinery: review and outlook[J]. Sensor Review, 2018, 38(1): 44-64.

[50] KUBASOV I V, KISLYUK A M, TURUTIN A V, et al. Low-frequency vibration sensor with a sub-nm sensitivity using a bidomain lithium niobate crystal[J]. Sensors, 2019, 19(3): 614.

[51] YE X W, SU Y H, HAN J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 652329.

[52] 罗小东，乔学光，贾振安，等. 低频光纤布拉格光栅振动加速度传感器研究[J]. 仪表技术与传感器，2013(12)：7-8，11.
LUO Xiaodong, QIAO Xueguang, JIA Zhenan, et al. Study on fiber bragg grating vibration acceleration sensor of low frequency[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(12): 7-8, 11.

[53] LIM K S, ZAINI M K A, ONG Z C, et al. Vibration mode analysis for a suspension bridge by using low-frequency cantilever-based FBG accelerometer array[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7000908.

[54] LIU Q P, QIAO X G, ZHAO J L, et al. Novel fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(10): 3000-3004.

[55] LI T L, GUO J X, TAN Y G, et al. Recent advances and tendency in fiber bragg grating-based vibration sensor: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12074-12087.

[56] YAO K, LIN Q J, JIANG Z D, et al. Modeling and analysis of a combined stress-vibration fiber bragg grating sensor[J]. Sensors, 2018, 18(3): 743.

[57] 周宏扬，马国明，张 猛，等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6452-6459.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the Michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6459.

[58] 陈沁楠. 双马赫—曾德型分布式光纤振动传感若干关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2015.
CHEN Qinnan. Research on key technologies of dual Mach-Zehnder distributed vibration sensing system[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2015.

[59] GRATTAN K T V, ZHANG Z Y, SUN T, et al. Sapphire-ruby single-crystal fibre for application in high temperature optical fibre thermometers: studies at temperatures up to 1500 ℃[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 981-986.

[60] MA S N, XU Y P, PANG Y X, et al. Optical fiber sensors for high-temperature monitoring: a review[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5722.

[61] MA G M, WANG Y, QIN W Q, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: a review[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.

[62] MOREDA F J G, ARREGUI F J, ACHAERANDIO M, et al. Study of indicators for the development of fluorescence based optical fiber temperature sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 118(1/2): 425-432.

[63] ZENG X Y, LIU R, LIU D D, et al. Cadmium-1, 3, 6, 8-tetrakis(4-carboxylphenyl)pyrene framework as a thermometer for fluorescence sensing of temperature[J]. Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie, 2019, 645(24): 1379-1383.

[64] CAUZZI D, PATTACINI R, DELFERRO M, et al. Temperature-dependent fluorescence of Cu_5 metal clusters: a molecular thermometer[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2012, 51(38): 9662-9665.

[65] SHU X W, ALLSOP T, GWANDU B, et al. High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge codoped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 818-820.

[66] WANG Q, DU C, ZHANG J M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating[J]. Optics Communications, 2016, 377: 89-93.

[67] ZOU F, LIU Y Q, ZHU S, et al. Temperature sensitivity enhancement of the nano-film coated long-period fiber gratings[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2460-2465.

[68] TSUTSUMI Y, OHASHI M, MIYOSHI Y. Temperature-sensitive mechanical LPFG using contractive force of heat-shrinkable tube[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(1): 55-59.

[69] ABI KAED BEY S K, SUN T, GRATTAN K T V. Optimization of a long-period grating-based Mach-Zehnder interferometer for temperature measurement[J]. Optics Communications, 2007, 272(1): 15-21.

[70] DES TOMBE B, SCHILPEROORT B, BAKKER M. Estimation of temperature and associated uncertainty from fiber-optic raman-spectrum distributed temperature sensing[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2235.

[71] DI PALMA P, COLLIN A, DE CARO F, et al. The role of fiber optic sensors for enhancing power system situational awareness: a review[J]. Smart Grids and Sustainable Energy, 2024, 9(1): 2.

[72] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Distributed-temperature sensing using stimulated brillouin scattering in optical silica fibers[J]. Optics Letters, 1990, 15(18): 1038-1040.

[73] DING Z Y, GUO H H, LIU K, et al. Advances in distributed optical fiber sensors based on optical frequency-domain reflectometry: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 26925-26941.

[74] LORANGER S, GAGNÉ M, LAMBIN-IEZZI V, et al. Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11177.

[75] XU D H, WANG Y L, XIONG B, et al. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: a review[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2017, 12(4): 557-566.

[76] JIANG J J, ZHAO Y, HONG Z Y, et al. Experimental study on quench detection of a no-insulation HTS coil based on raman-scattering technology in optical fiber[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 4702105.

[77] LU H, HU Y L, XIAO Y Z, et al. Recent progress of the quench detection in the EAST HTS current leads using distributed optical fibers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(8): 9000907.

[78] CHEN B, LI J G, HU Y L, et al. Distributed optical fiber sensor for investigation of normal zone propagation and hot spot location in REBCO cables[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 156: 111569.

[79] HAN X T, LI J H, ZHANG L, et al. A novel PD detection technique for use in GIS based on a combination of UHF and optical sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2890-2897.

[80] LI Z, QIAN Y, ZANG Y M, et al. Optical partial discharge detection and diagnosis method based on PHOG features[J/OL].[2023-11-07]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023: 1. https: //doi. org/10.1109/TDEI. 2023.3330697.

[81] DENISOV B N. A photoresistor as a multifunctional optoelectronic element[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2007, 52(4): 478-481.

[82] FOSSUM E R, HONDONGWA D B. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2014, 2(3): 33-43.

[83] DUTTA A, DEKA B, SAHU P P. Modeling and fabrication of evanescent waveguide-based optical sensor for sensitivity enhancement using silicon oxynitride technology[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 077101.

[84] XIE R, GE X Y, SUN Z, et al. Partial discharge detection in transformer based on optical method[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China: IEEE, 2018: 3243-3248.

[85] HAN X T, ZHANG X R, GUO R C, et al. Partial discharge detection in gas-insulated switchgears using sensors integrated with UHF and optical sensing methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2026-2033.

[86] ZANG Y M, QIAN Y, WANG H, et al. A novel optical localization method for partial discharge source using ANFIS virtual sensors and simulation fingerprint in GIL[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3522411.

[87] MA G M, ZHOU H Y, ZHANG M, et al. A high sensitivity optical fiber sensor for GIS partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9235-9243.

[88] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. Nature Electronics, 2018, 1: 68-73.

[89] HUANG J A, WU X M, WANG X H, et al. A novel high-sensitivity electrostatic biased electric field sensor[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(9): 095008.

[90] XUE F, HU J, GUO Y, 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.

[91] ZHANG B, XUE J Y, CHEN X Y, et al. Review of surface transient charge measurement on solid insulating materials via the pockels technique[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 608-624.

[92] 韩志飞，胡　军，李立涅，等. 面向新型电力系统的微型电场传感技术[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：399-414.
HAN Zhifei, HU Jun, LI Licheng, et al. Progress of micro electric field sensing technology for new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 399-414.

[93] 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.

[94] HAN Z F, XUE F, HU J, et al. Trampoline-shaped micro electric-field sensor for AC/DC high electric field measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13791-13798.

[95] HAN Z F, XUE F, YANG G Z, et al. Micro-cantilever capacitive sensor for high-resolution measurement of electric fields[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4317-4324.

[96] 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.

[97] 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.

[98] LONG F, ZHANG J H, YUAN Z W, et al. Application of the pockels effect to electric current measurement[C]//Proceedings of SPIE 6838, Optoelectronic Devices and Integration II. Beijing, China: SPIE, 2008: 68381H.

[99] QIU Z Q, BADER S D. Surface magneto-optic Kerr effect[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1243-1255.

[100] ZENG R, WANG B, YU Z Q, et al. Integrated optical *E*-field sensor based on balanced Mach-Zehnder interferometer[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 114404.

[101] 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.

[102] 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.

[103] 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.

[104] CHEN T, SHAFAI C, RAJAPAKSE A, et al. Micromachined AC/DC electric field sensor with modulated sensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 245: 76-84.

[105] ZENG R, WANG B, YU Z Q, 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.

[106] ZENG R, YU J J, WANG B, et al. Study of an integrated optical sensor with mono-shielding electrode for intense transient *E*-field measurement[J]. Measurement, 2014, 50: 356-362.

[107] XU H L, ZHANG Z Y, SHI R B, et al. Batch-fabricated high-performance graphene Hall elements[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1207.

[108] OUYANG Y, HE J L, HU J, et al. A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: design and potential smart grid applications[J]. Sensors, 2012, 12(11): 15520-15541.

[109] GARCÍA-ARRIBAS A, FERNÁNDEZ E, SVALOV A V, et al. Tailoring the magnetic anisotropy of thin film permalloy microstrips by combined shape and induced anisotropies[J]. The European Physical Journal B, 2013, 86(4): 136.

[110] KHAN M A, SUN J, LI B D, et al. Magnetic sensors-a review and recent technologies[J]. Engineering Research Express, 2021, 3(2): 022005.

[111] FRANCO V, DODRILL B. Magnetic measurement techniques for materials characterization[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

[112] JOO M K, KIM J, LEE G, et al. Feasibility of ultra-sensitive 2D layered hall elements[J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 021029.

[113] BLAGOJEVIC M, KAYAL M, GERVAIS M, et al. SOI hall-sensor front end for energy measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(4): 1016-1021.

[114] PAUN M A. Three-dimensional simulations in optimal performance trial between two types of Hall sensors fabrication technologies[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 391: 122-128.

[115] SADEGHI M, SEXTON J, LIANG C W, et al. Highly sensitive nano-tesla quantum-well hall-effect integrated circuit using GaAs-InGaAs-AlGaAs 2DEG[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1817-1824.

[116] HANED N, MISSOUS M. Nano-tesla magnetic field magnetometry using an InGaAs-AlGaAs-GaAs 2DEG hall sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 102(3): 216-222.

[117] HUANG L, ZHANG Z Y, CHEN B Y, et al. Ultra-sensitive graphene Hall elements[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(18): 183106.

[118] IZCI D, DALE C, KEEGAN N, et al. The construction of a graphene Hall effect magnetometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9534-9541.

[119] DAUBER J, SAGADE A A, OELLERS M, et al. Ultra-sensitive hall sensors based on graphene encapsulated in hexagonal boron nitride[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(19): 193501.

[120] XU L, YU H, HAN S J, et al. Giant magnetoresistive sensors for DNA microarray[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 3989-3991.

[121] WANG S X, LI G X. Advances in giant magnetoresistance biosensors with magnetic nanoparticle tags: review and outlook[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(7): 1687-1702.

[122] HALL D A, GASTER R S, LIN T, et al. GMR biosensor arrays: a system perspective[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, 25(9): 2051-2057.

[123] HALL D A, GASTER R S, OSTERFELD S J, et al. GMR biosensor arrays: correction techniques for reproducibility and enhanced sensitivity[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, 25(9): 2177-2181.

[124] LI X, LV W X, HAN Y, et al. Magnetoimpedance effect in FINEMET/$Ni_{80}Fe_{20}$ composite ribbons[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 730: 17-22.

[125] BUZNIKOV N A, KURLYANDSKAYA G V. Magnetoimpedance in symmetric and non-symmetric nanostructured multilayers: a theoretical study[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1761.

[126] VILELA G L S, MONSALVE J G, RODRIGUES A R, et al. Giant magnetoimpedance effect in a thin-film multilayer meander-like sensor[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(12): 124501.

[127] USOV N A, ANTONOV A S, LAGAR'KOV A N. Theory of giant

magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1998, 185(2): 159-173.

[128] LI B D, KOSEL J. A thin film passive magnetic field sensor operated at 425 MHz[C]//2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII). Barcelona, Spain: IEEE, 2013: 466-469.

[129] UCHIYAMA T, MOHRI K, NAKAYAMA S. Measurement of spontaneous oscillatory magnetic field of guinea-pig smooth muscle preparation using pico-tesla resolution amorphous wire magneto-impedance sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3070-3073.

[130] OUYANG Y, HE J L, HU J, et al. Contactless current sensors based on magnetic tunnel junction for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 4004904.

[131] CUBELLS M D, REIG C, DE MARCELLIS A, et al. Magnetic tunnel junction (MTJ) sensors for integrated circuits (IC) electric current measurement[C]//Sensors, 2013 IEEE. Baltimore, USA: IEEE, 2013: 1-4.

[132] LAI W M, HSU F M, SUNG W L, et al. Monolithic integration of micro magnetic pillar array with anisotropic magneto-resistive (AMR) structure for out-of-plane magnetic field detection[C]//2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Estoril, Portugal: IEEE, 2015: 901-904.

[133] WANG Z G, WANG X J, LI M H, et al. Highly sensitive flexible magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance effect[J]. Advanced Materials, 2016, 28(42): 9370-9377.

[134] GROSZ A, MOR V, AMRUSI S, et al. A high-resolution planar hall effect magnetometer for ultra-low frequencies[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 3224-3230.

[135] GROSZ A, MOR V, PAPERNO E, et al. Planar Hall effect sensors with subnanotesla resolution[J]. IEEE Magnetics Letters, 2013, 4: 6500104.

[136] SAARI M M, SAKAI K, KIWA T, et al. A sensitive magnetometer utilizing high-T_c SQUID for magnetic property characterization[J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(9): 3413-3420.

[137] SCHMELZ M, STOLZ R, ZAKOSARENKO V, et al. Field-stable SQUID magnetometer with sub-fT/Hz$^{1/2}$ resolution based on sub-micrometer cross-type josephson tunnel junctions[J]. Superconductor Science and Technology, 2011, 24(6): 065009.

[138] SCHMELZ M, STOLZ R, ZAKOSARENKO V, et al. Sub-fT/Hz$^{1/2}$ resolution and field-stable SQUID magnetometer based on low parasitic capacitance sub-micrometer cross-type josephson tunnel junctions[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2012, 482: 27-32.

[139] 陈正达，付　聪，陈少华，等. 一种气体电化学传感器补偿电路的研究与应用[J]. 中国仪器仪表，2024(4)：66-70.
CHEN Zhengda, FU Cong, CHEN Shaohua, et al. Research and application of a compensation circuit with gas electrochemical sensor[J]. China Instrumentation, 2024(4): 66-70.

[140] HARTMANN F. Semiconductor sensors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 628(1): 40-49.

[141] DEL ORBE HENRIQUEZ D, CHO I, YANG H, et al. Pt nanostructures fabricated by local hydrothermal synthesis for low-power catalytic-combustion hydrogen sensors[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(1): 7-12.

[142] LIU J, SUN Y Z, FRYE-MASON G, et al. Fiber-based optical fabry-perot gas sensor for fast and on-column detection[C]//Proceedings of SPIE 7604, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIV. San Francisco, USA: SPIE, 2010: 760413.

[143] 丁善昆，韩基昆，王巧珍，等. 色谱在线监测装置在大一变 I 组主变上的应用[J]. 东北电力技术，1997，18(2)：24-26.
DING Shankun, HAN Jikun, WANG Qiaozhen, et al. Application of online chromatographic monitoring device in the main transformer of dayi substation[J]. Northeast Electric Power Technology, 1997, 18(2): 24-26.

[144] MAO X F, ZHOU X L, ZHAI L, et al. Dissolved gas-in-oil analysis in transformers based on near-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(5/6): 940-946.

[145] KOROTCENKOV G, HAN S D, STETTER J R. Review of electrochemical hydrogen sensors[J]. Chemical Reviews, 2009, 109(3): 1402-1433.

[146] 母　坤，童杏林，胡　畔，等. 氢气传感器的技术现状及发展趋势[J]. 激光杂志，2016，37(5)：1-5.
MU Kun, TONG Xinglin, HU Pan, et al. Technology status and development trend of hydrogen sensor[J]. Laser Journal, 2016, 37(5): 1-5.

[147] 杨明红，王高鹏，代吉祥，等. 面向应用的光纤氢气传感技术[J]. 应用科学学报，2018，36(1)：1-19.
YANG Minghong, WANG Gaopeng, DAI Jixiang, et al. Application-oriented fiber optic hydrogen sensing technology[J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(1): 1-19.

[148] FISSER M, BADCOCK R A, TEAL P D, et al. High-sensitivity fiber-optic sensor for hydrogen detection in gas and transformer oil[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9): 3348-3357.

[149] BUTLER M A. Micromirror optical-fiber hydrogen sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1994, 22(2): 155-163.

[150] TIEN C L, CHEN H W, LIU W F, et al. Hydrogen sensor based on side-polished fiber bragg gratings coated with thin palladium film[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(16): 5360-5363.

[151] 张晓星，刘　恒，张　英，等. 基于光声光谱峰面积的微量乙炔气体定量检测[J]. 高电压技术，2015，41(3)：857-863.
ZHANG Xiaoxing, LIU Heng, ZHANG Ying, et al. Quantum detection of trace acetylene gas based on the peak area of photoacoustic spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 857-863.

[152] 曾　毅，李志军，严新荣，等. 光声光谱技术在电厂变压器在线监测中的应用[J]. 计算技术与自动化，2017，36(4)：60-63.
ZENG Yi, LI Zhijun, YAN Xinrong, et al. Photoacoustic spectroscopy applyed to transformer on-line monitoring in power plant[J]. Computing Technology and Automation, 2017, 36(4): 60-63.

[153] 王　渊，马国明，谢洋洋，等. 无需油气分离的油中溶解乙炔原位直接检测[J]. 中国电机工程学报，2023，43(20)：8151-8160.
WANG Yuan, MA Guoming, XIE Yangyang, et al. Direct detection of oil-dissolved acetylene without oil-gas separation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 8151-8160.

[154] 孙　浩. 便携式气相色谱仪的开发与应用研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
SUN Hao. Development and application of portable gas chromatograph[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2015.

[155] JIN L, KIM D, ABU-SIADA A, et al. Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: a review[J]. Energies, 2022, 15(9): 3379.

[156] 门金龙，胡炜杰，蔡冲冲，等. 可燃气体传感器研究综述[J]. 科学技术与工程，2021，21(15)：6123-6131.
MEN Jinlong, HU Weijie, CAI Chongchong, et al. Review of combustible gas sensors[J]. Science Technology and Engineering, 2021,

21(15): 6123-6131.

[157] 黄楚佳. 基于多孔阳极氧化铝薄膜的 F-P 光纤传感技术研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2016.
HUANG Chujia. Research on ptical fiber Fabry-Perot interferometer sensors based on porous anodic alumina film[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2016.

[158] 江　军，马国明，宋宏图，等. 基于侧边抛磨光纤布拉格光栅的变压器油中溶解氢气传感器[J]. 电工技术学报，2017，32(13)：264-270.
JIANG Jun, MA Guoming, SONG Hongtu, et al. Dissolved hydrogen sensor in power transformer oilbased on side polishing fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 264-270.

[159] 黄政伟. 基于光声光谱法的变压器油中溶解气体在线检测技术[J]. 分析仪器，2023(5)：6-11.
HUANG Zhengwei. The on-line detection technology of dissolved gases in transformer oil based on photoacoustic spectroscopy[J]. Analytical Instrumentation, 2023(5): 6-11.

[160] 李恩文，王力农，宋　斌，等. 基于改进模糊聚类算法的变压器油色谱分析[J]. 电工技术学报，2018，33(19)：4594-4602.
LI Enwen, WANG Linong, SONG Bin, et al. Analysis of transformer oil chromatography based on improved fuzzy clustering algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4594-4602.

[161] 周　峰，李　鹤，李文婷，等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1905-1920.
ZHOU Feng, LI He, LI Wenting, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.

[162] SOLGAARD O, GODIL A A, HOWE R T, et al. Optical MEMS: from micromirrors to complex systems[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(3): 517-538.

[163] MOUAPI A, MRAD H, PARSAD A. Implementation of a reliability test protocol for a multimeasurement sensor dedicated to industrial applications of the internet of things[J]. Measurement, 2020, 152: 107312.

[164] 齐　虹，王蕴辉，易德兴，等. 硅压力传感器的可靠性试验方法及失效分析[J]. 传感器技术，2001，20(4)：31-33.
QI Hong, WANG Yunhui, YI Dexing, et al. Reliability test method and failure analysis for silicon pressure transducer[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(4): 31-33.

[165] 胡连亚，李　剑，周海鹰，等. 无线传感器网络可靠性技术分析[J]. 计算机科学，2014，41(增刊 1)：247-251，285.
HU Lianya, LI Jian, ZHOU Haiying, et al. Reliability research for wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Science, 2014, 41(Supplement 1): 247-251, 285.

[166] 杨　光，李金国，苏兴荣. 提高电涡流传感器可靠性试验和分析方法研究[J]. 电子测量与仪器学报，2007，21(2)：35-39.
YANG Guang, LI Jinguo, SU Xingrong. Test and analysis of reliability improvement for eddy current sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(2): 35-39.

[167] 张　博，常帅帅，陶亚光，等. 基于无线传输的输电线路舞动监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器，2022(3)：103-108.
ZHANG Bo, CHANG Shuaishuai, TAO Yaguang, et al. Design of transmission line galloping monitoring system based on wireless transmission[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 103-108.

[168] 郭步阳，卢启硕. 输电线路状态监测远程可视监控系统设计[J]. 设备管理与维修，2022(16)：153-154.
GUO Buyang, LU Qishuo. Design of remote visual monitoring system for transmission line condition monitoring[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(16): 153-154.

[169] 岳龙旺，刘保国. 高压输电线路覆冰远程监控系统研究[J]. 机械设计与制造，2018(2)：94-96.
YUE Longwang, LIU Baoguo. Remote monitoring system study of the high voltage transmission line with covering ice[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 94-96.

[170] 刘鹏翔，曹洪奎，阿依汗，等. 基于 ZigBee 与 GPRS 的输电杆塔倾斜监测预警系统[J]. 电子制作，2019，27(11)：42-45.
LIU Pengxiang, CAO Hongkui, AYIHAN, et al. Tilt monitoring and early warning system for transmission towers based on ZigBee and GPRS[J]. Practical Electronics, 2019, 27(11): 42-45.

[171] 赵　坤，何　勇，代亮亮. 基于 LoRa 的高压输电线路工况监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器，2022(9)：72-76.
ZHAO Kun, HE Yong, DAI Liangliang. Design of working condition monitoring system for high-voltage transmission lines based on LoRa[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(9): 72-76.

[172] 刘艳丽，仝　杰，孙建平，等. 北斗卫星短报文技术在输电线路在线监测系统中的应用[J]. 电力信息与通信技术，2016，14(11)：28-32.
LIU Yanli, TONG Jie, SUN Jianping, et al. Application of beidou satellite short message technology in transmission line online monitoring system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(11): 28-32.

[173] 李春龙，黄　辉，梁　云，等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]. 中国电力，2021，54(2)：27-35.
LI Chunlong, HUANG Hui, LIANG Yun, et al. Power sensor-oriented development and challenges of environmental energy harvesting technologies[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 27-35.

[174] 张　琛，熊　庆，汲胜昌，等. 基于压电材料的变压器振动能量收集装置研究[J]. 电力工程技术，2021，40(6)：173-178.
ZHANG Chen, XIONG Qing, JI Shengchang, et al. Vibration energy harvesting device for transformer based on piezoelectric material[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 173-178.

[175] IDOKO J A, BAMGBADE O B, ABUBAKAR I N, et al. Design of automatic solar tracking system prototype to maximize solar energy extraction[C]//2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference. Nairobi, Kenya: IEEE, 2020: 1-5.

[176] WU C S, WANG A C, DING W B, et al. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(1): 1802906.

[177] 王云承. 低功耗在线监测装置的环境取能方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2015.
WANG Yuncheng. Study on ambient energy harvesting methods for low-power online monitoring devices[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.

[178] 陈　赦，胡东阳，汪　泓，等. 电网状态监测装置自取能技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2077-2089.
CHEN She, HU Dongyang, WANG Feng, et al. Review on energy-harvesting technology for power grid condition monitoring device[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2077-2089.

[179] 郭　峪，王　鹏，张冀川，等. 高压输电系统电磁能量收集与存储技术综述[J]. 储能科学与技术，2019，8(1)：32-46.
GUO Shen, WANG Peng, ZHANG Jichuan, et al. An overview of electromagnetic energy collection and storage technologies for a high voltage transmission system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1): 32-46.

[180] 李德建. 智能电网中能量收集技术及应用综述[J]. 电子技术应用，

2023，49(2)：1-8.
LI Dejian. Review of energy harvesting technologies and applications in smart grid[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 1-8.
[181] 张　允，王战江，蒋淑兰，等. 振动能量收集技术的研究现状与展望[J]. 机械科学与技术，2019，38(7)：985-1018.
ZHANG Yun, WANG Zhanjiang, JIANG Shulan, et al. Retrospectives and perspectives of vibration energy harvest technologies[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(7): 985-1018.
[182] DENG H C, XIAO S, YANG A J, et al. Advances in nanogenerators for electrical power system state sensing and monitoring[J]. Nano Energy, 2023, 115: 108738.
[183] HE X M, WEN Q, SUN Y F, et al. A low-frequency piezoelectric-electromagnetic-triboelectric hybrid broadband vibration energy harvester[J]. Nano Energy, 2017, 40: 300-307.
[184] 代博文，何忠波，杨朝舒，等. 基于超磁致伸缩材料的振动能量复合采能装置现状分析[J]. 机床与液压，2021，49(2)：141-151.
DAI Bowen, HE Zhongbo, YANG Zhaoshu, et al. Development status of vibration energy hybrid harvester based on giant magnetostrictive material[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(2): 141-151.
[185] RODRIGUES C, GOMES A, GHOSH A, et al. Power-generating footwear based on a triboelectric-electromagnetic-piezoelectric hybrid nanogenerator[J]. Nano Energy, 2019, 62: 660-666.
[186] ALI T, KHAN F U. A silicone based piezoelectric and electromagnetic hybrid vibration energy harvester[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(5): 055003.
[187] PANG Y K, FANG Y H, SU J J, et al. Soft ball-based triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerators for wave energy harvesting[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(6): 2201246.
[188] HAO C C, HE J, ZHAI C, et al. Two-dimensional triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for wave energy harvesting[J]. Nano Energy, 2019, 58: 147-157.
[189] GUO Y L, CHEN Y D, MA J M, et al. Harvesting wind energy: a hybridized design of pinwheel by coupling triboelectrification and electromagnetic induction effects[J]. Nano Energy, 2019, 60: 641-648.
[190] YANG X Y, DAOUD W A. Triboelectric and piezoelectric effects in a combined tribo-piezoelectric nanogenerator based on an interfacial ZnO nanostructure[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(45): 8194-8201.



江俊杰
1990—，男，博士，助理研究员
从事电力设备状态监测、先进光学传感技术研究
E-mail: jiangjunjie@sjtu.edu.cn

JIANG Junjie
Ph.D.



刘亚东(通信作者)
1982—，男，博士，研究员，博导
从事电力设备状态监测与故障诊断方面的研究
E-mail: lyd@sjtu.edu.cn

LIU Yadong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-06-17　修回日期　2024-07-16　　编辑　卫李静

附录 A

表 A1　关于智能电网建设需求的部分国家政策性文件

Table A1　Some national policy documents on the needs of smart grid construction

发布时间	政策名称	发布单位与相关政策内容
2024/2	《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》	发改委、能源局：到 2030 年，基本完成配电网柔性化、智能化、数字化转型。
2023/9	《关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见》	发改委、能源局：持续开展设备隐患排查治理和状态监测，提高电力系统运行控制的自适应和数字化水平，实现调度决策从自动化向智能化转变，提升新能源和配电网的可观、可测、可控能力。
2023/9	《电力需求侧管理办法(2023 年版)》	发改委、工信部、财政部、住建部、国资委、能源局：推进数字经济与电力经济融合，培育电力经济新增长点，建立健全智能用电技术体系、组织体系、监管体系、评价体系等。
2023/7	《关于实施农村电网巩固提升工程的指导意见》	发改委、能源局、乡村振兴局：到 2025 年，农村电网具备一定数字化、智能化能力，通过稳步推动农村电网数智化发展，推进智能配电网建设。
2023/3	《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》	能源局：以数字化智能化电网支撑新型电力系统建设。构建智能感知体系，充分运用人工智能、数字孪生等数字技术提高电网联合调度、辅助决策的智能化水平。
2022/10	《鼓励外商投资产业目录(2022 年版)》	发改委：鼓励外商在“智能电网设备、电气成套控制系统设备制造”“电网智能管理控制系统设备制造”等方向的投资。
2022/3	《关于推进共建“一带一路”绿色发展的意见》	发改委、外交部、环境部、商务部：重点围绕智能电网开展联合研究及交流培训。
2022/1	《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》	发改委、能源局：推动互联网、数字化、智能化技术与电力系统融合发展，加强新型电力系统技术体系建设，开展相关技术试点和区域示范。
2020/9	《关于扩大战略性新兴产业投资培育壮大新增长点增长极的指导意见》	发改委、科技部、工信部、财政部：加快建设智能电网等基础设施网络。
2020/6	《关于做好 2020 年能源安全保障工作的指导意见》	发改委、能源局：实施配电网建设改造行动计划，推进粤港澳大湾区、长三角一体化等区域智能电网高标准建设。
2019/7	《工业领域电力需求侧管理工作指南》	工信部：基于物联网技术实时监测变配电设备、线路、开关的运行方式及运行数据，加强供配电系统可靠性指标统计分析和故障预测等。
2018/10	《清洁能源消纳行动计划(2018—2020 年)》	发改委、能源局：实施城乡配电网建设和智能化升级。
2018/2	《关于提升电力系统调节能力的指导意见》	发改委、能源局：开展配电网建设改造，推动智能电网建设，提高信息化、智能化水平。
2016/3	《关于在能源领域积极推广政府和社会资本合作模式的通知》	能源局：合作重点包括了供电/城市配电网建设改造、农村电网改造升级、智能电网项目等。
2016/10	《关于加快推进“一带一路”空间信息走廊建设与应用的指导意见》	国防科工局、发改委：促进空间信息与大数据、物联网、移动通信、数字电视和云计算等高新技术的融合发展，拓展空间信息在智能电网等领域的服务。
2016/7	《关于推动积极发挥新消费引领作用加快培育形成新供给新动力重点任务落实的分工方案》	发改委：调整完善有利于智能微电网新基础设施建设。
2016/8	《关于切实做好传统基础设施领域政府和社会资本合作有关工作的通知》	发改委：电力及新能源类：在供电/城市配电网建设改造、农村电网改造升级、智能电网项目等方面重点推广 PPP 模式。
2016/5	《关于推进电能替代的指导意见》	发改委、能源局、财政部、环境部、住建部、工信部、交通运输部、民航局：结合《中国制造 2025》，发挥“产学研用”机制，加快与智能电网技术、新一代大数据信息技术的深度融合，发展高端电力装备与增值服务。
2016/2	《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》	发改委、能源局、工信部：综合能源网络以建设以智能电网为基础。
2015/8	《关于加快配电网建设改造的指导意见》	发改委：以智能化为方向，采用先进物联网、现代传感和信息通信等技术，全面提升配电网装备水平。完善智能设备技术标准体系，引导设备制造科学发展。
2015/7	《关于促进智能电网发展的指导意见》	发改委、能源局：推广应用输变电设备状态诊断、智能巡检技术，建立电网对冰灾、山火、雷电、台风等自然灾害的自动识别、应急、防御和恢复系统；鼓励云计算、大数据、物联网、移动互联网、骨干光纤传送网、能源路由器等信息通信技术在电力系统的应用支撑，建立开放、泛在、智能、互动、可信的电力信息通信网络。
2015/5	《中国制造 2025》	国务院：推进智能电网用输变电及用户端设备发展。

表 A2　关于智能传感技术建设需求的部分国家政策性文件

Table A2　Some national policy documents on the construction needs of intelligent sensing technology

发布时间	政策名称	发布单位与相关政策内容
2023/8	《电子信息制造业 2023—2024 年稳增长行动方案》	工信部、财政部：面向个人计算、新型显示、VRAR、5G 通信、智能网联汽车等重点领域，推动电子材料、电子专用设备和电子测量仪器技术攻关。
2023/6	《制造业可靠性提升实施意见》	工信部、教育部、科技部、财政部、市场监管总局：重点提升新型敏感元件及传感器、高适应性传感器模组等的可靠性水平。
2022/8	《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》	工信部、财政部、商务部、国资委、市场监管总局：加速数字化传感器等保护与控制核心装备研制与应用。
2022/7	《产业基础创新发展目录(2021 年版)》	国家产业基础专家委员会：智能电流与功率测量传感芯片、高精度压力传感元件、高精度超声传感器、宽温区压力传感器等。
2022/6	《关于推动轻工业高质量发展的指导意见》	工信部、人社部、环境部、商务部、市场监管总局：加快中置电机力矩传感器、高能效锂电池安全等关键技术突破。
2022/1	《计量发展规划(2021—2035 年)》	国务院：加快量子传感器、太赫兹传感器、高端圈像传感器、高速光电传感器等传感器的研制和应用。实施仪器设备质量提升工程，强化计量在仪器设备研发、设计、试验、生产和使用中的基础保障作用。建立仪器仪表计量测试评价制度。
2022/1	《“十四五”数字经济发展规划》	国务院：瞄准传感器等战略性前瞻性领域，发挥我国社会主义制度优势、新型举国体制优势、超大规模市场优势，提高数字技术基础研发能力。
2021/12	《“十四五”国家信息化规划》	中央网络安全和信息化委员会：加快推动重大技术装备与新一代信息技术融合发展，加强新型传感器、智能测量仪表、工业控制系统、网络通信模块等智能核心装置在重大技术装备产品上的集成应用，利用新一代信息技术增强产品的数据采集和分析能力。
2021/9	《物联网新型基础设施建设三年行动计划(2021—2023 年)》	工信部：加快智能传感器等在城市交通基础设施中的应用部署。
2021/3	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五远景目标纲要》	全国人民代表大会：在事关国家安全和发展全局的基础核心领域，制定实施战略性科学计划和科学工程。瞄准人工智能、量子信息、集成电路等前沿领域，实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。
2021/1	《基础电子元器件产业发展行动计划(2021—2023 年)》	工信部：重点发展小型化、低功耗、集成化、高灵敏度的敏感元件，温度、气体、位移、速度、光电、生化等类别的高端传感器。新型 MEMS 传感器和智能传感器，微型化、智能化的电声器件。
2021/1	《工业互联网创新发展行动计划(2021—2023 年)》	国务院、工信部：鼓励信息技术与工业技术企业联合推进工业 5G 芯片/模组/网关、智能传感器、边缘操作系统等基础软硬件研发。
2019/12	《2019 年工业强基重点产品，工艺“一条龙”应用计划示范企业和示范项目公示》	工信部：立足传感器制造工艺，兼顾 MEMS 等技术，以产业链上下游供需能力为基础，应用为导向，针对关键环节及重点基础产品，形成上下游产业对接的“一条龙”应用示范链条，按照“以我为主，兼收并蓄”的原则，推进产学研用世界化协同创新，深化产业链协作。
2019/8	《产业结构调整指导目录(2019 年本)》	发改委：鼓励研发具有无线通信功能的低功耗各类智能传感圈，可加密传感器，核级监测仪表和传感器。
2017/12	《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018—2020 年)》	工信部：着重提出率先突破智能传感器等核心技术，在模拟仿真、设计、MEMS 工艺、封装及个性化测试技术方面达到国际先进水平。
2017/5	《智能传感器产业三年行动指南(2017—2019)》	工信部：推进智能传感器向中高端升级、开展智能传感器应用示范、建设智能传感器创新中心、完善产业链并促进传感产业集聚发展。
2016/12	《信息通信行业发展规划物联网分册(2016—2020 年)》	工信部：规划强调应突破关键核心技术，开展面向重点领域的高性能、低成本、集成化、微型化、低功耗智能传感器技术和产品研发，提升智能传感器设计、制造、封装与集成、多传感器集成与数据融合及可靠性领域技术水平。
2016/12	《“十三五”国家信息化规划的通知》	国务院：推进智能硬件、新型传感器等创新发展，加快高精度、低功耗，高可靠性传感器的研发和应用。
2016/7	《“十三五”国家科技创新规划》	国务院：开展 MEMS(微机电系统)传感器的研发，开展工业传感器核心器件、智能仪器仪表、传感器集成应用等技术攻关。
2015/5	《中国制造 2025》	国务院：将“集成电路及专用设备”作为新一代信息技术产业的重点突破口。

表 A3　电力传感技术标准(部分)

Table A3　Technical standards for power sensing (Part)

序号	标准编号	标准中文名称	标准性质
1	ANSI/ASTM D1868-2007	绝缘系统评估中局部放电(电晕)脉冲的探测和测量用试验方法	美国标准
2	ANSI/ICEA T-24-380-2007	局部放电试验程序标准	国际标准
3	ANSI/IEEE 1291-1993	电力开关设备局部放电测量指南	国际标准
4	ANSI/IEEE 436-1991	电子电路变压器产生电晕(局部放电)的测量指南	国际标准
5	ANSI/IEEE C57.127-2007	油浸电力变压器和电抗器中局部放电声排放的探测和定位的指南	国际标准
6	ASTM D1868-2007	绝缘系统评定中局部放电(电晕)脉冲检测和测量的标准试验方法	美国标准
7	ASTM D3382-2007	用电桥技术测量局部放电(电晕)引起的能量和总电荷转移的标准试验方法	美国标准
8	BS DD IEC/TS 61934:2011	电子绝缘材料和系统-在短上升时间和反复电压脉冲下局部放电(PD)的电子测量	国际标准
9	BS EN 60247-2004	绝缘液体-相对电容率、电介质损耗因数(tanδ)和直流电阻率的测量	欧洲标准
10	BS EN 60567-2005	注油电气设备-游离和溶解气体分析用气体和油的取样-指南	欧洲标准
11	BS EN 61181-2007	填充矿物油的电气设备-溶解气体分析(DGA)用于电气设备工厂试验	欧洲标准
12	DIN EN 60247-2005	绝缘液体-相对电容率、电介质损耗因数(tanδ)和直流电阻率的测量	欧洲标准
13	DIN EN 60567-2006	充油电气设备-分析游离气体和溶解气体用气体和油的取样-指南	欧洲标准
14	DIN EN 61181-2007	填充矿物油的电气设备-溶解气体分析(DGA)用于电气设备的工厂试验	欧洲标准
15	EN 60270-2001	高压测试技术-局部放电测量	欧洲标准
16	EN 60567-1992	充油电气设备中气体和油取样及游离和溶解气体分析指南	欧洲标准
17	EN 61620-1999	绝缘液体-测量电导和电容量确定介质损耗因数-试验方法	欧洲标准
18	IEC 60076-2-2011	电力变压器-第 2 部分：液浸变压器的温升	国际标准
19	IEC 60247-2004	液体绝缘材料-相对电容率、电介质损耗因数(tanδ)和直流电阻率的测量	国际标准
20	IEC 60270:2000	高压试验技术-局部放电测量	国际标准
21	IEC 60480-2004	从电气设备中取出六氟化硫(SF_6)的检验和处理指南及其再使用规范	国际标准
22	UNE-EN 60567:2012	充油电气设备-分析游离气体和溶解气体用气体和油的取样.指南	国际标准
23	IEC 60996:1989	可用于电容器的介质损耗角正切 δ 测量的核校准确度的方法	国际标准
24	LST EN 61181-2007	填充矿物油的电气设备-溶解气体分析(DGA)用于电气设备工厂试验	国际标准
25	IEC 61620:1998	绝缘液体-测量电导和电容确定介质损耗因数.试验方法	国际标准
26	IEC TR3 61294:1993	绝缘液体-局部放电起始电压(PDIV)测定.试验规程	国际标准
27	IEEE 1291-1993	在电源开关中测量局部放电的指南	国际标准
28	IEEE C 37.108-2002	电网变压器保护指南	国际标准
29	IEEE C 57.127-2000	油浸电力变压器局部放电所发出声音探测的试用指南	国际标准
30	NF C27-224-1992	浸油电设备气体和油的抽样指南和游离及溶解气体的分析指南	法国标准
31	NF C27-601-1978	在电气设备上提取的六氟化硫的检验指南	法国标准
32	prEN 60247-2001	绝缘液体的相对电容率、电介质损耗因数和直流电阻率的测量	欧洲标准
33	GB/T 23642-2017	电气绝缘材料和系统 瞬时上升和重复冲击电压条件下的局部放电(PD)电气测量	国家标准
34	GB/T 7354-2018	局部放电测量	国家标准
35	GB/T 6040-2019	红外光谱分析方法通则	国家标准
36	GB/T 13584-2011	红外探测器参数测试方法	国家标准
37	GB/T 2424.26-2008	电工电子产品环境试验 第 3 部分：支持文件和导则 振动试验选择	国家标准
38	GB/T 10593.3-1990	电工电子产品环境参数测量方法振动数据处理和归纳	国家标准
39	GB/T 17623-2017	绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法	国家标准
40	GB/T 5654-2007	液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量	国家标准
41	GB/T 21216-2007	绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法	国家标准
42	GB/T 17648-1998	绝缘液体局部放电起始电压测定试验程序	国家标准
43	GB/T 7354-2018	高电压试验技术 局部放电测量	国家标准
44	GB/T 23642-2017	电气绝缘材料和系统 瞬时上升和重复电压冲击条件下的局部放电(PD)电气测量	国家标准
45	GB/T 7354-2018	局部放电测量	国家标准
46	GB/T 42287-2022	高电压试验技术 电磁和声学法测量局部放电	国家标准
47	GB/T 1094.2-2013	电力变压器 第 2 部分：液浸式变压器的温升	国家标准
48	GB/T 17623-2017	绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法	国家标准
49	GB/T 8905-2012	六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则	国家标准
50	GB/T 11023-2018	高压开关设备六氟化硫气体密封试验导则	国家标准
51	GB/T 8905-2012	六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则	国家标准
52	GB/T 28537-2012	高压开关设备和控制设备中六氟化硫(SF_6)的使用和处理	国家标准

续表 A3

序号	标准编号	标准中文名称	标准性质
53	GB/T 11023-2018	高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法	国家标准
54	GB/T 12913-2008	电容器纸介质损耗因数(tanδ)测定法	国家标准
55	GB/T 1409-2006	测量电气绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波波长在内)下电容率和介质损耗因数的推荐方法	国家标准
56	GB/T 11297.9-2015	热释电材料介质损耗角正切 tanδ 的测试方法	国家标准
57	GB/T 40095-2021	智能变电站测控装置技术规范	国家标准
58	GB/T 37136-2018	电力用户供配电设施运行维护规范	国家标准
59	GB/T 40773-2021	变电站辅助设施监控系统技术规范	国家标准
60	DL/T 1154-2012	高压电气设备额定电压下介质损耗因数试验导则	行业标准
61	DL/T 1205-2013	六氟化硫电气设备分解产物试验方法	行业标准
62	DL/T 1243-2013	换流变压器现场局部放电测试技术	行业标准
63	DL/T 1250-2013	气体绝缘金属封闭开关设备带电超声局部放电检测应用导则	行业标准
64	DL/T 1275-2013	1000 kV 变压器局部放电现场测量技术导则	行业标准
65	DL/T 1327-2014	高压交流变电站可听噪声测量方法	行业标准
66	DL/T 1359-2014	六氟化硫电气设备故障气体分析和判断方法	行业标准
67	DL/T 1433-2015	变压器铁芯接地电流测量装置通用技术条件	行业标准
68	DL/T 1534-2016	油浸式电力变压器局部放电的特高频检测方法	行业标准
69	DL/T 1540-2016	油浸式交流电抗器(变压器)运行振动测量方法	行业标准
70	DL/T 1630-2016	气体绝缘金属封闭开关设备局部放电特高频检测技术规范	行业标准
71	DL/T 1686-2017	六氟化硫高压断路器状态检修导则	行业标准
72	DL/T 1687-2017	六氟化硫高压断路器状态评价导则	行业标准
73	DL/T 1807-2018	油浸式电力变压器、电抗器局部放电超声波检测与定位导则	行业标准
74	DL/T 1814-2018	油浸式电力变压器工厂试验油中溶解气体分析判断导则	行业标准
75	DL/T 1986-2019	六氟化硫混合气体绝缘设备气体检测技术规范	行业标准
76	DL/T 1993-2019	电气设备用六氟化硫气体回收、再生及再利用技术规范	行业标准
77	DL/T 1999-2019	换流变压器直流局部放电测量现场试验方法	行业标准
78	DL/T 2000-2019	1000 kV 交流变压器本体与调压补偿变压器联合局部放电现场测量导则	行业标准
79	DL/T 2001-2019	换流变压器空载、负载和温升现场试验导则	行业标准
80	DL/T 2086-2020	高压输电线路和变电站噪声的传声器阵列测量方法	行业标准
81	DL/T 2552-2022	油浸式电力变压器用光纤测温装置技术规范	行业标准
82	DL/T 417-2006	电力设备局部放电现场测量导则	行业标准
83	DL/T 474.3-2018	现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 tanδ 试验	行业标准
84	GB/T 8905-2012	六氟化硫电气设备气体监督导则	行业标准
85	DL/T 664-2016	带电设备红外诊断应用规范	行业标准
86	DL/T 722-2014	变压器油中溶解气体分析和判断导则	行业标准
87	DL/T 919-2005	六氟化硫气体中矿物油含量测定法(红外光谱分析法)	行业标准
88	JB/T 10492-2011	金属氧化物避雷器用监测装置	行业标准
89	JB/T 12422-2015	电气绝缘材料和绝缘制件局部放电试验方法	行业标准
90	JB/T 12422-2015	电气绝缘材料和绝缘制件局部放电试验方法	行业标准
91	JB/T 8639-1997	油浸式电力变压器 带有油中溶解气体分析的温升试验导则	行业标准
92	NB/T 10091-2018	高压开关设备温度在线监测装置技术规范	行业标准
93	SJ 2488-1984	电子设备用变压器、阻流圈和铁芯噪声测试方法	行业标准
94	SJT 1147-1993	电容器用有机薄膜介质损耗角正切值和介电常数试验方法	行业标准
95	T/CEC 142-2017	变压器油中溶解气体在线监测装置运行导则	团体标准
96	T/CEC 291.3-2020	天然酯绝缘油电力变压器 第 3 部分：油中溶解气体分析导则	团体标准
97	T/CEC 480-2021	变压器有载分接开关振动特性现场测试应用导则	团体标准
98	T/CEC 671-2022	变压器油中溶解气体在线监测装置现场校验方法	团体标准
99	T/CEEIA 528-2021	光纤传感器电气设备振动检测 第 2 部分：气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)	团体标准
100	T/CEEIA 529-2021	光纤传感器电气设备振动检测 第 3 部分：变压器	团体标准
101	T/CES 021-2018	气体绝缘金属封闭开关设备机械振动检测技术规范	团体标准
102	T/CES 055-2021	高压开关设备分合闸线圈电流检测技术导则	团体标准
103	T/CES 114-2022	智能型特高频局部放电在线监测装置技术规范	团体标准
104	T/CES 160-2022	数字孪生变电站智能传感器接入技术	团体标准
105	T/CES 216-2023	配电电缆接头局放和温度在线监测智能传感器技术规范	团体标准

续表 A3

序号	标准编号	标准中文名称	标准性质
106	T/CES 018-2018	配电网 10 kV 及 20 kV 交流传感器技术条件	团体标准
107	T/CES 260-2023	电缆隧道无线传感网络及通信设备配置技术规范	团体标准
108	T/CSEE 0032-2017	电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值带电测试方法	团体标准
109	T/CSEE 0038-2017	变电站站界噪声测试技术规范	团体标准
110	T/DGAS 017-2021	10 kV 及以下电力设备局部放电带电测试技术规范	团体标准
111	T/GDCKCJH 055-2022	配电变压器现场温升试验导则	团体标准
112	T/JSEE 001-2018	高压断路器机械振动检测技术现场应用导则	团体标准
113	DB65/T 4595-2022	高压开关柜局部放电在线监测装置技术规范	地方标准
114	JJF(鄂)26-2016	脉冲电流法局部放电测试仪校准规范	地方标准
115	DB65/T 4595-2022	高压开关柜局部放电在线监测装置技术规范	地方标准
116	DB4403/T 137-2021	用户智能配电站系统建设规范	地方标准
117	JJF(鄂)/1142-2023	交直流电流传感器校准规范	地方标准
118	Q/GDW 11311-2021	气体绝缘金属封闭开关设备特高频法局部放电在线监测装置技术规范	企业标准
119	Q/GDW 11835-2018	12 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备局部放电试验导则	企业标准
120	Q/GDW 11218-2018	±1100 kV 换流变压器交流局部放电现场试验导则	企业标准
121	Q/CSG 11401-2010	气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)局部放电特高频检测技术规范	企业标准
122	Q/GDW 11400-2015	电力设备高频局部放电带电测试技术现场应用导则	企业标准
123	Q/GDW 11282-2014	气体绝缘金属封闭开关设备特高频局部 放电传感器现场检验规范	企业标准
124	Q/GDW 11218-2014	±1100 kV 换流变压器交流局部放电现场试验导则	企业标准
125	Q/GDW 11311-2014	气体绝缘金属封闭开关设备特高频法局部放电在线监测装置技术规范	企业标准
126	Q/GDW 11368-2014	变压器铁芯接地电流带电检测技术现场应用导则	企业标准
127	Q/GDW 10536-2021	变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范	企业标准
128	Q/GDW 11366-2014	开关设备分合闸线圈电流波形带电检测技术现场应用导则	企业标准
129	Q/GDW 11366-2014	开关设备分合闸线圈电流波形带电检测技术现场应用导则	企业标准
130	Q/GDW 1895-2013	电容型设备介质损耗因数和电容量带电测试技术现场应用导则	企业标准
131	Q/GDW 11369-2019	避雷器泄漏电流带电检测技术现场应用导则	企业标准
132	Q/GDW 12082-2021	输变电设备物联网无线传感器通用技术规范	企业标准
133	Q/GDW 12184-2021	输变电设备物联网无线传感器运维规范	企业标准
134	Q/GDW 12087-2021	输变电设备物联网传感器安装及验收规范	企业标准
135	Q/GDW 12162-2021	隔离开关分合闸位置双确认磁感应传感装置技术规范	企业标准