第 50 卷 第 8 期：3303-3323 高电压技术 Vol.50, No.8: 3303-3323
2024 年 8 月 31 日 High Voltage Engineering August 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240893

电力系统中的雷电暂态感知、监测和应用

杨 庆[1]，柯 锟[1]，胡 军[2]，姚子恒[1]，吴世林[2]，何金良[2]
（1.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;
2. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084）

摘 要：雷电是造成电力系统故障的首要原因，实现对雷电暂态电压电流信号的感知、监测和数据应用对于维护系统安全稳定运行具有重要意义。面向日益复杂的新型电力系统结构形态，传感器件在满足雷电宽频测量的基础上，监测装置正朝着微型化、高精度、强互联和易取能方向发展。因此，该文基于雷电暂态感知方法、监测装置关键技术和雷击数据统计应用的研究现状，首先介绍了基于不同原理的电压/电场和电流/磁场传感技术，并分析了各自的优缺点；其次梳理了传感器微型化、时间同步、通信和供能等关键技术的最新进展；随后通过对雷击暂态波形的统计分析，探讨了监测数据在雷击故障识别与定位中的应用；最后对电力系统中雷电暂态感知、监测与应用进行总结并对其发展趋势作出展望。

关键词：电压/电场传感技术；电流/磁场传感技术；微型化技术；时间同步；供能与通信；统计分析；雷击故障识别与定位

Lightning Transient Sensing, Monitoring and Applications in Power Systems

YANG Qing[1], KE Kun[1], HU Jun[2], YAO Ziheng[1], WU Shilin[2], HE Jinliang[2]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract：Lightning is the primary cause of power system failures, and it is of important significance to implement the sensing and monitoring of lightning transient voltage and current and to realize data application to ensure safe and stable system operation. With the increasing complexity of modern power systems, sensor components must satisfy the demands for broad-spectrum lightning measurement, while monitoring devices are advancing towards miniaturization, high precision, robust connectivity, and simplified access to energy. This paper reviews current research on lightning transient sensing methodologies, key monitoring technologies, and the statistical utilization of lightning data. Initially, the voltage/electric field and current/magnetic field sensing techniques are introduced based on diverse principles,and their respective strengths and limitations are analyzed. Subsequently, recent strides on pivotal technologies such as sensor miniaturization, time synchronization, communication protocols, and power supply methods are examined. The application of monitoring data in identifying and localizing lightning fault is further explored through statistical analysis of transient waveforms. Finally, the findings on lightning transient sensing, monitoring practices, and their application within power systems are summarized, and the prospects in future developmental trends are put forward.

Key words：voltage/electric field sensing technology; current/magnetic field sensing technology; miniaturization technology; time synchronization; energy supply and communication; statistical analysis; lightning fault identification and localization

0 引言

雷电作为联合国公布的十大自然灾害之一，是造成电力系统故障、供电中断的首要原因，其诱发的续流电弧甚至引起森林火灾等严重次生灾害，因此提高电网的防灾减灾救灾能力是维护能源安全、电力系统稳定的重大战略需求[1]。雷电电磁暂态的全面、精准感知及监测，有利于提高电网的稳定性和可靠性，保证电网高效率运行[2]。因此，着力提升雷电电磁暂态感知与监测能力，加快电力传感数据应用，全面提升电网运行服务质量，是主动适应时代发展、推动新型电力系统向更高水平发展的必然趋势。

基金资助项目：国家自然科学基金 (52077019)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077019).

雷电具有不确定性和参数随机性的特点，且受电网拓扑结构、传输路径以及电力负荷多样性等因素的影响，其电磁暂态电压、电流信号呈现大幅值、高陡度和宽频带的复杂特征[3]。目前，电压互感器(potential transformer，TV)和电流互感器(current transformer，TA)是获取雷电电磁暂态电压电流信号的主要途径[4]，然而 2 者无法满足 10 kHz~3 MHz 的频带测量需求，且受限于大尺寸和体积，无法实现广域部署和狭小空间内安装[5]，导致有效的实测数据匮乏，特别是在复杂地形环境和具有更多分支、馈线的配电网中。过去数十年，应用保护单元或雷电定位系统(lightning location systems，LLS)[6]为电力系统的雷击故障识别和定位提供了重要数据支撑。但保护单元通常安装在变电站中，以较低的采样频率捕获雷电暂态电压电流信号，LLS 则主要实现对输电线路的监测，利用电磁场和到达时间差(time difference of arrival，TDOA)的间接测量方法来检索故障位置[7]。在这种情况下，获得变电站及输电线路沿线的暂态特性和准确识别故障类型均较为困难且定位精度有待提升。针对雷电暂态宽频电压电流信号感知困难、监测系统难以广域部署以及数据缺乏应用等难题，国内外电力工作者和科研人员在雷电暂态电压电流感知、监测和应用方面进行了长期的基础研究和工程实践。近年来，随着能源互联网的快速发展，宽频电压(电场)、电流(磁场)感知技术、传感器微型化、集成化与智能化技术均取得了长足的进步。不同感知原理的传感技术被提出，例如基于电荷感应原理和光学效应的电压传感器能够实现数兆至百兆赫兹带宽的检测[8]，Rogowski 线圈对电流的测量频带也可达百兆赫兹[9]，满足了雷电暂态信号宽频感知的需求。同时传感器微型化和集成化技术使尺寸仅为厘米级的器件能够实现监测系统的所有功能[10]，这为实现广域监测奠定了基础。现阶段低成本、高精度的监测系统已能够实现分布式部署并在输配电线路和变电站完成了试点应用[11]。此外，有研究结果表明基于先进传感技术的分布式监测系统采集的含有雷击故障暂态关键指纹信息的实测数据，例如雷电暂态电压和电流的幅值、频率和波形等[12]，有助于进行特性分析并构建统计数据库，同时结合智能算法深度挖掘数据信息[13]，可实现雷击故障的快速识别与定位并降低诊断误差，提高定位精度，达到快速处置故障、缩减运维成本的应用效果。本文后续将对传感、监测等技术进行阐述、梳理，并对其应用展开讨论。

近期，CIGRE 专门成立了 C4.61 工作组，对电网雷电电磁暂态的感知方法和应用给予特别关注。为此，本文首先总结了基于不同原理的电压/电场和电流/磁场传感技术，分析了各自的优缺点；其次，梳理了微型化技术、时间同步技术、无线通信技术和供能技术的最新进展；接着，介绍了基于雷电暂态波形信息的应用情况；最后，完成了对现有研究的总结，并对电力系统中雷电暂态感知、监测与应用的发展趋势作出了展望。

1 电力系统中雷电暂态电压/电流的传感技术

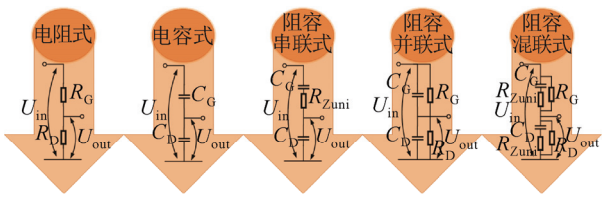
雷电暂态电压电流信号能够直接反映输电线路、电气设备的运行状态和故障信息，是电力系统中最重要和最基本的电参量。本章将从电压/电场，电流/磁场角度对传感技术的基本原理和优缺点进行介绍。

1.1 电压测量传感技术

1.1.1 阻容分压式

由电阻和电容元件通过不同的连接方式构成不同类型的分压器，如图 1 所示。其检测原理均是通过变比计算测量电压[14]。

电阻式分压器适用于 35 kV 以下的低压交流(alternating current，AC)和直流(direct current，DC)测量，在高频电压下工作具有较大的误差。电容分压器适用于工频交流和谐波电压测量，文献[15]提出 1 种基于陶瓷电容分压原理的雷电过电压监测装置，信号采用无线传输，功率自采集模块可从单条线路吸取 2 W 的功率，在实验室条件下获得了良好的瞬态响应特性和线性度，且该装置已应用于配电网系统并成功捕获雷电引起的过电压信号。套管末屏式电压传感器是典型的电容分压型传感器，其导杆对地主电容为高压臂电容，套管末屏串联定值电容为低压臂电容，从而形成电容型分压器实现对电网雷电暂态过电压的监测[16]，如图 2 所示。



U_{in}—输入电压；U_{out}—输出电压；
R_G—高压臂电阻；R_D—低压臂电阻；R_{Zuni}—阻尼电阻；
C_G—高压臂电容；C_D—低压臂电容。

图 1 各种分压器原理图

Fig.1 Schematic diagram of various voltage dividers

该类型传感器具备优异的频率响应特性，结构简单且易安装。此外，接入的传感器体积小，具有较高的绝缘水平并配备完善的保护措施，能够满足高电压等级宽频电压测量的要求[17]。目前，该传感器已成功应用于 110~750 kV 电压等级的变电站，实现了雷电过电压的测量[18]。然而，若传感器发生断路或接地断线，可能导致套管末屏放电，同时当传感器与末屏抽头连接时，难以避免引入额外的杂散电感，这种杂散电感的增加会导致传感器输出波形出现剧烈振荡，从而影响其输出特性。

电阻-电容串联型适用于工频交流电压、谐波电压、故障行波电压及瞬态过电压测量，电阻-电容并联型适用于直流、工频交流电压和谐波电压的测量[19]，电阻-电容混联型适用于测量直流、工频交流电压、谐波电压、故障行波电压和瞬态过电压[20]，电阻-电容型分压器通过串并联 2 种形式可减少对地杂散电容的影响，其等效电阻可抑制大多数高频振荡以实现精确测量，混联型也是当下测量最有效、最可靠的结构。目前分压类测量装置存在的最大问题是：与高压输电线路或母线长期并联运行会给系统安全带来潜在风险，一般应用于低电压等级，例如 10 kV、35 kV 配电网，对于 220 kV 及以上电网电压的测量，使用阻容分压器作为专用分压器的情况较少。

1.1.2　耦合电容式

耦合电容式传感器主要实现高压架空输电线路电压的在线监测，主要原理是通过架空线和传感器之间的杂散电容以及传感器的分压电容器实现电压测量[21]，图 3 显示了典型的耦合电容式电压传感器。在感应金属板周围，传输线与感应金属板之间存在杂散电容 C_1，感应金属板和屏蔽壳之间存在低压电容 C_2。

假设传输线上的电压为 U，由于电容计算的串联原理，金属板上感应电压 U_{induced} 可描述为：

$$U_{\text{induced}}=\frac{C_2}{C_1+C_2}U \tag{1}$$

图 4 是耦合电容式电压传感器的 2 种典型测量方法。一种是高电位测量，即高压信号直接从耦合分压电容器的高压侧获得，其中 C_{M1} 为输出电压电容，C_{M2} 为测量电极对地电容，C_{S1} 为等电位调节电容，C_{S2} 为屏蔽电极对地电容，C_{MS} 为测量电极和屏蔽电极间的互电容。另一种方法是通过地电位进行测量，将传感器布置在靠近地面的地方，通过去耦

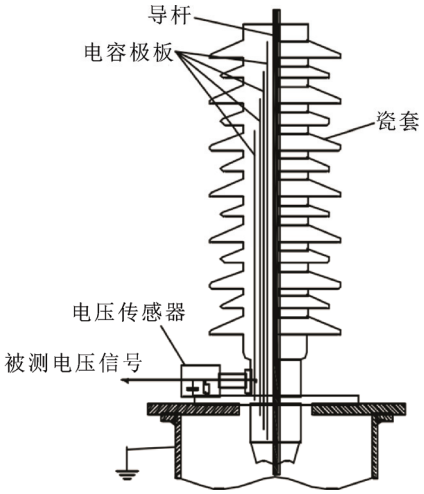


图 2　套管端屏电压传感器安装示意图[17]

Fig.2　Schematic diagram of the casing end screen voltage sensor installation[17]

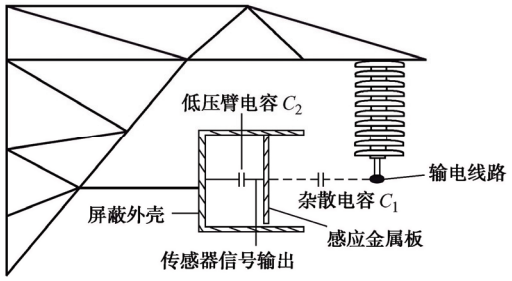


图 3　耦合电容式电压传感器[21]

Fig.3　Coupling capacitive voltage sensor[21]

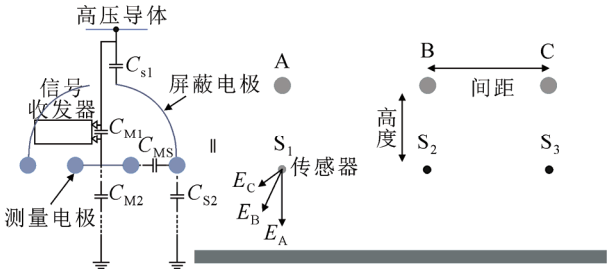


图 4　高电位和接地电位测量示意图[21]

Fig.4　High potential and ground potential measurement schematic[21]

法获得传感器处产生的电场的比例因子，得到耦合矩阵，并利用测量的三相电场信号反演电压[22]，A、B 和 C 为三相导体，S_1、S_2 及 S_3 为传感器安装位置，E_A、E_B 和 E_C 为不同导体产生的电场强度。耦合电容式传感器的测量动态范围比无铁芯和其他非线性特性的电磁变压器更宽，绝缘强度也更高，且可避免与系统的铁磁共振，还能够与电容器耦合实现载波通信。但测量的雷电暂态电压信号不能长距离传

输，电信号需经过硬件屏蔽设计和软件算法改进才能够降低复杂电磁环境的干扰，从而实现精准测量。

1.1.3 电流积分式

电流积分式将电流信号转换为电压信号，一般由电流传感器、电容器外壳和积分器组成[23]，原理如图 5 所示。其中 C 是电容器外壳等效电容，TA 是精密电流传感器，R_d 是积分电阻。

当待测对象电压为 $u_1(t)$时，电容器外壳对地的泄漏电流 $i_1(t)$为：

$$i_1(t)=C\frac{\mathrm{d}u_1(t)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

假设精密电流传感器的变比是 k_1，那么在积分电阻 R_d 上则会产生一个电压 $u_2(t)$：

$$u_2(t)=k_1C\frac{\mathrm{d}u_1(t)}{\mathrm{d}t}R_d \tag{3}$$

经过积分常数 T_i 的积分器后，输出电压 $u_0(t)$为：

$$u_0(t)=\frac{1}{T_i}\int u_2(t)\mathrm{d}t=\frac{k_1CR_d}{T_i}u_1(t) \tag{4}$$

从式(4)可以看出，电流积分式电压传感器的输出电压与待测对象电压呈线性关系，同时考虑到电容器不消耗有功功率，因此该方法可用于高压电网。当采用小 TA 作传感器元件时，即使电流信号很小，也能实现高精度测量。该种测量方式结构简单，无需变更一次侧设备接线方式，不影响电力系统安全，但在现场安装时需要对接地装置进行改造。

1.1.4 电荷感应式

当传感器置于电场中时，金属电极会产生感应电荷，电荷量的改变会形成感应电流，通过后端处理电路对感应电流进行检测从而实现电压测量[24]。电荷感应式主要分为 D-dot 传感器和场磨机式，考虑到场磨机式的测量带宽最高仅达千赫兹，难以覆盖兆赫兹级的雷电暂态电压信号，此处不展开介绍。D-dot 得益于优良的高频瞬态响应特性，常被应用于脉冲电力设备的瞬态电压波形测量中。D-dot 传感器的主要结构可简化为 1 阶 RC 电路，通过调节电路参数可实现对几赫兹至几十兆赫兹电压信号的测量[25]，其简化模型如图 6 所示。

当 D-dot 传感器与被测导体邻近时，传感器的金属电极表面因耦合效应产生电荷 q。取电极表面附近的一个封闭高斯面，在高斯表面上取一个微量元素 $\mathrm{d}A$，E_n 是电场法向量，$E(r,t)$是被测点的电场强度，ε_0 是空间电介质常数。根据高斯定理：

$$q=\oint_A\varepsilon_0E(r,t)\mathrm{d}A \tag{5}$$

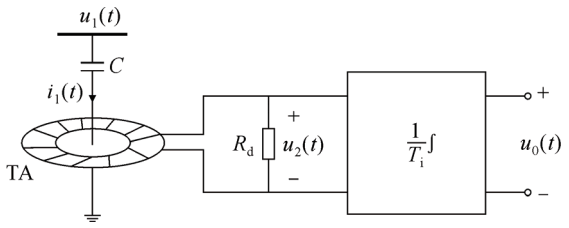


图 5 电流型检测原理示意图[23]

Fig.5 Schematic diagram of current-type sensing principle[23]

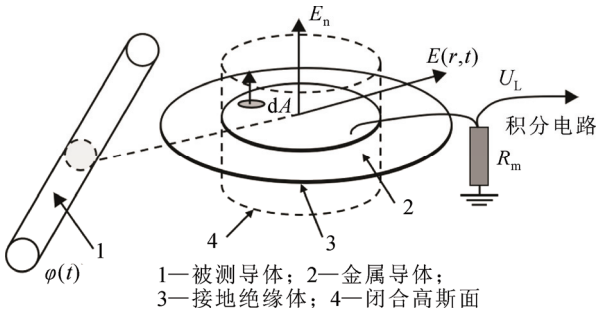


图 6 D-dot 传感测量原理[24]

Fig.6 Measurement principle of D-dot probe[24]

传感器的测量电阻 R_m 一端与金属电极相连，另一端接地，当电流经过电阻时会产生压降 $V_L(t)$。此外，被测导体和传感器输出电压间的线性比例系数被称为传感器的等效面积 A_{eq}，受被测电场强度矢量和电极法向分量的夹角以及导体形状的影响。传感器输出电压 $V_L(t)$和被测导体电位 $\varphi(t)$的关系为：

$$V_L(t)=R_mA_{eq}\frac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

在实际应用中，D-dot 传感器的放置会导致空间电场发生畸变，从而导致其运行的稳定性受到影响且被测对象周围的电场容易受环境的干扰。所以将该感知方法推广到电网的雷电暂态电压测量和保护中，还需要对电磁屏蔽、抗干扰等技术进一步研究，最终提高其测量的准确性。

1.1.5 电光效应式

基于电光效应的基本原理是将电场或电压的电信号转换成光信号进行感知和测量，然后利用光纤传输[26]。依据电场作用在电光材料上导致折射率发生改变的特性，可将其分为一次电光(Pockels)和二次电光(Kerr)效应，折射率 n 和电场 E 之间的关系可以表示为：

$$n(E)=n-\frac{1}{2}\gamma n^3E-\frac{1}{2}\xi n^3E^2 \tag{7}$$

式中：$n(E)$是外施电场时的介质折射率；γ 和 ξ 是常数；等式右边第 1 项是初始时介质的折射率，第 2 项与外施电场 E 成正比，即表示一次电光效应，第

3 项与 E^2 成正比，则表示二次电光效应。目前应用较为广泛的是基于一次电光效应的传感方法，主要得益于折射率与外施电场成正比且该方法具备无损传输、动态响应速度快以及能够实现宽频测量等优势[27]。当下主流应用的电光材料包括磷酸二氢钾(KDP)、磷酸二氢铵(ADP)、钛酸锂($LiTaO_3$)和铌酸锂($LiNbO_3$)等，而基于上述材料的传感器拓扑结构又分为集成马赫曾德尔(Mach-Zehnder，M-Z)干涉和体效应干涉两种。

1）M-Z 干涉

激光在输入端经过 Y 型分叉后形成两束功率相等的光束在平行波导中传输，其中一束光在电场的作用下在输出端与另一束光产生一定的相位差，从而发生干涉，2 束光之间的相位差 $\Delta\varphi$ 与外施电场之间的关系可表示为：

$$\Delta\varphi=\frac{\pi k n_e^3\gamma_{33}L}{\lambda}E_{ef} \tag{8}$$

式中：k 是衰减常数；n_e 是电光晶体的异常折射率；γ_{33} 是晶体的线性电光系数；L 是作用在光波导上的电场的有效长度；λ 是光波的波长；E_{ef} 是外施电场。当 $\Delta\varphi=\pi$ 时，2 束光在输出端的功率进行叠加，此时可获取传感器的最大测试范围。通过改变传感器的拓扑结构提升其特性是常用的方法。例如文献[28]设计了不同电极结构的集成 M-Z 干涉光学电场传感器，电场测量可达 70~600 kV/m 且频率响应达到 20 Hz~100 MHz 范围，该团队为进一步提升测量范围，设计了一种单屏蔽电极结构，测量电场达到 1200 kV/m。文献[29]利用天线和电极一体化方式使得传感器的分辨率达 1 mV/m，带宽达到 3 GHz。

2）体效应干涉

体效应式电场传感器使用块状电光晶体作为核心敏感元件，晶体在电场作用下，由 Pockels 效应产生双折射。偏振光穿过电光晶体，经过电场调制，产生与电场成正比的偏振相位变化，通过后置光学检偏元件获取偏振相位变化量，进而计算出外施电场信息。根据外施电场方向与通光方向之间的相对关系，可分为纵向和横向两种调制方式。考虑纵向调制方式通常为接触式，而非接触式是未来的主流方向，因此本文主要对横向调制展开介绍。基于横向调制的电场和电压计算式如下：

$$\begin{cases}E_\pi=\dfrac{1}{L_M}\dfrac{\lambda}{(n_e^3\gamma_{33}-n_0^3\gamma_{13})}\\ V_\pi=\dfrac{d}{L_M}\dfrac{\lambda}{(n_e^3\gamma_{33}-n_0^3\gamma_{13})}\end{cases} \tag{9}$$

式中：L_M 为电光晶体通光长度；n_0 为没有施加外加电场时的折射率；γ_{13} 为电光系数的张量元素；d 为晶体厚度，由式(9)可以看出，通过改变电光晶体的大小可以调节测量的电场和电压。文献[30]通过将一次电光效应和电容耦合原理相结合的方式设计了一种非接触式过电压传感器，将高压通过电容转换为低压耦合至电光调制单元。同时为提升传感器的温度稳定性，采用了双铌酸锂晶体补偿策略，其结构如图 7 所示。

通过阵列形式对多点测量的电场进行电压反演，文献[31]提出了一种分布式光学电压传感器，但该方式需考虑的因素较多，例如传感器数量、布置位置、反演方法等，导致应用存在一定难度。上述介绍均基于一次电光效应，而二次电光效应由于电光系数弱且难以获取线性段区域，因此基于二次电光效应的传感器应用于电场电压测量较少见。总体来说，光学传感器制作成本较高，温度稳定性差，且由于激光源的存在导致集成封装困难，从而限制了其发展。

1.1.6　逆压电效应式

基于逆压电效应的电压传感器利用晶体/聚合物/多晶体材料的逆压电效应，将施加于晶体上的电压信号转换为材料的形变/位移信号，再进一步通过其他方式对此形变或位移进行检测，实现对外施电压的传感与测量。其基本表达式为：

$$\Delta D=M_{ij}\Delta U=M_{ij}\frac{\Delta E}{N} \tag{10}$$

式中：ΔD 为压电材料在外加电压作用下的变形；M_{ij} 为压电陶瓷在外加电压方向上的压电常数；i 为电场方向；j 为应力或应变方向；ΔU 为外加电压的大小；ΔE 为外加电场的大小；N 为电极间距。通过压电材料与其他原理进行耦合形成了压电-光栅、压电-电阻和压电-电容类传感器。

当前研究结果表明，压电-光栅和压电-电阻类传感器在雷电过电压信号测量方面还需进一步拓宽

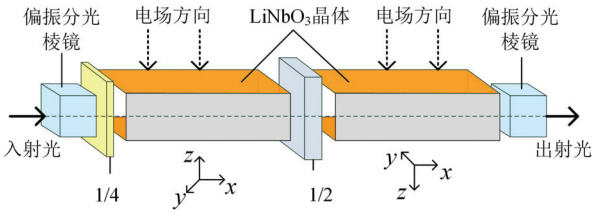


图 7　电光传感单元示意图[30]

Fig.7　Schematic diagram of electro-optic sensing unit[30]

其频带范围。例如，文献[32]设计的压电-光栅传感器测量带宽范围为 50 Hz~20 kHz；文献[33]研制的压电-压阻式微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)电场传感器带宽为 0~100 kHz。相比之下，压电-电容结构的带宽有了大幅度提升，文献[34]利用极化方向相反的压电聚合物堆叠，通过与固定电容结合形成的压电-电容结构最大频率测量范围达到 10 MHz。为提升电场传感器的响应特性，文献[35]设计了一种压电悬臂电容式电场传感器，结构见图 8 所示，通过压电薄膜的作用使得悬臂梁结构发生弯折进而改变电容，该结构传感器分辨率达 45 V/m，由百伏每米提升至数十伏每米。综合来说，基于逆压电效应的 MEMS 电场传感器具有体积小、结构简单的优势，但检测其微小的变化量需借助精密仪器，因此整体体积庞大且成本高，同时研究主要停留在实验室阶段，尚无实际应用。

除上述传感类型外，近年来涌现出多种新型耦合原理的传感器，其中值得特别注意的是静电力-压阻电场传感器。文献[36]设计的传感器结构如图 9 所示，R_1—R_4 为压阻掺杂区的 4 个电阻，压阻掺杂区通过金属电极连接形成惠斯通桥结构，U_s 为惠斯通桥的输入电压，U_0 为惠斯通桥的输出电压。

该传感器的交流分辨率为 172 V/(m·Hz$^{1/2}$)，线性可测量电场范围为 312 V/m~700 kV/m，可应用于雷电预警方面。该传感器通过电场产生的静电力作为驱动源，降低了传感器的功耗。并利用微型化技术使得其尺寸大幅减小，具备了易生产和成本低的优点。此外，利用静电力驱动的 2 倍频特性，使其具有良好的信噪比。然而，受限于机械结构，实现雷电暂态电压的全频域测量还需进一步研究。

以上是电力系统中基于不同原理的雷电暂态电压测量方法，表 1 总结了各种传感器的带宽和优缺点。

1.2 电流测量传感技术

1.2.1 Rogowski 式

Rogowski 线圈由单匝原边和多匝副边构成，基于法拉第电磁感应定律和安培环路定律，实现高电压大电流信号的转换[37]。Rogowski 线圈又可分为绕制式线圈和印制电路板(printed circuit board, PCB)式线圈，绕制 Rogowski 线圈通过在 1 个非磁性骨架上绕制漆包线制成，PCB 式 Rogowski 线圈利用印刷电路板制作，图 10 为绕制式和 PCB 式。

Rogowski 线圈作为电流互感器已广泛应用于不同行业的大电流、高频电流和脉冲电流测量。文献[38]设计了一种自供电雷电流传感器，可以实现 10~200 kA 范围内的雷电流线性测量。文献[39]开发并测试了光学 Rogowski 线圈，其频带高达百兆赫兹。相比传统 Rogowski 线圈，PCB 式 Rogowski 线圈可以保证印制导线均匀布置、线匝的截面积相等、

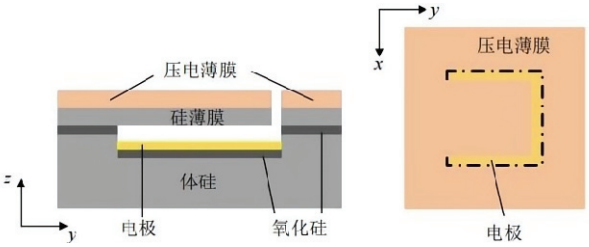


图 8 压电悬臂电容式电场传感器[35]

Fig.8 Piezoelectric cantilever capacitive electric field sensors[35]

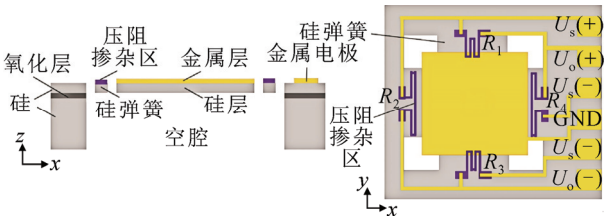


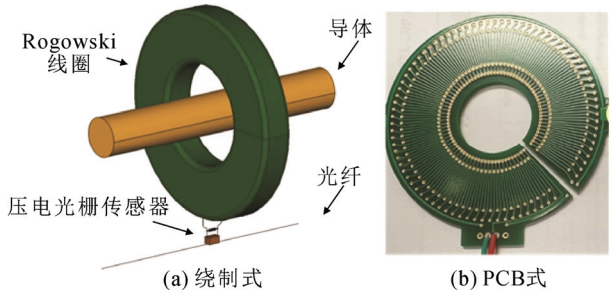
图 9 静电力-压阻效应耦合的电场传感器[36]

Fig.9 Electric field sensor based on electrostatic force-piezoresistive effect coupling[36]

表 1 电压/电场传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of voltage/electric field sensors

传感器类型	频带	优点	缺点
阻容式[17]	DC~AC 数兆赫兹	技术成熟；准确性高；结构简单；温度稳定性好；动态响应性好；过载能力强	输出非线性；测量精确度易受影响；需改变电路拓扑结构
耦合电容式[21]	数兆赫兹	不改变一次接线、安全性高	输出波形受杂散电容电感影响
电流积分式[23]	数兆赫兹	结构简单、精度高、功耗低	会对测量对象带来干扰
D-dot[25]	数十兆赫兹	测量原理简单、测量范围大	对原场有较大畸变、抗干扰能力差
电光效应式[3]	20 Hz~3 GHz	无源器件、无损传输、全电介质材料封装、测量频带宽、动态响应快等特性	光路补偿结构复杂/成本昂贵
逆压电效应式[34]	AC 约 10 MHz	无源，量程大	体积大/成本高
静电力压阻式[36]	千赫兹	结构简单、精度高、功耗低	频带有待进一步提升



(a) 绕制式　(b) PCB式

图 10　绕制式和 PCB 式线圈

Fig.10　Winding and PCB coils

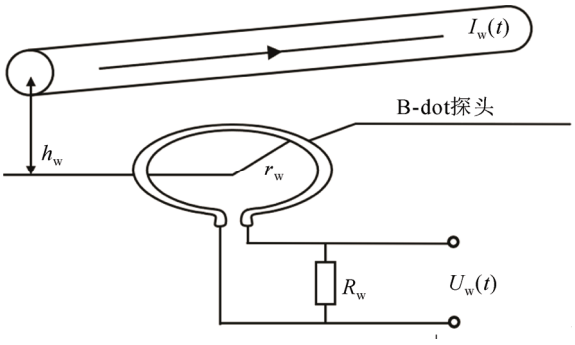


图 11　B-dot 电流传感原理图

Fig.11　Current measurement schematics of B-Dot

分布参数一致，更易于制作，不但克服了传统式 Rogowski 线圈的缺点，而且在灵敏度、测量精度及性能稳定性方面均优于传统 Rogowski 线圈。总的来说，Rogowski 线圈作为一种雷电流测量装置具备许多优点，例如不存在饱和、磁滞以及非线性问题，响应速度快，测量精度高，并能获取雷电流的全波波形[37]。然而，实际应用中也存在一些问题。通常情况下，Rogowski 线圈安装在引雷针、绝缘子串、杆塔或输电线路上。当其安装在引雷针上时，只能测量直击输电杆塔的雷电流，且加装引雷针可能增加杆塔遭受雷击的概率，存在安全隐患。安装在绝缘子串或者是杆塔上时，主要测量该杆塔上的雷击闪络电流和杆塔的入地电流，但无法测量其他杆塔的雷电流波形。考虑到成本和安全因素，很难在所有杆塔上均安装监测装置。另外，直接安装在输电导线和避雷线时，需要停电才能进行安装和维护，这大大增加了电力部门的经济负担与工作强度。

1.2.2　B-dot 电流式

B-dot 是一种具有特殊结构的 Rogowski 线圈，主要用于测量变化的磁场，也可通过测量由变化的电流产生变化的磁场达到间接测量电流的目的[40]。图 11 为 B-dot 电流传感器原理图，h_w 是探头中心与导体之间的距离，r_w 是 B-dot 探针环半径。根据电磁感应原理，当电流 $I_w(t)$发生变化时，B-dot 探头上产生的感应电压信号 $U_w(t)$由电阻 R_w 计算。

B-dot 探头相当于与电阻串联并由感应电压驱动的电感器。当 $r_w<<h_w$ 时，通过 B-dot 线圈的磁场可认为是均匀的，且可得到式(11)所示表达式。

$$\varepsilon(t)=-S\frac{\mathrm{d}B(t)}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

式中：$\varepsilon(t)$为传感线圈上产生的电压；S 为探头线圈有效面积；$B(t)$为线圈中由时间 t 处电流变化激发的磁场中的磁感应强度；磁场强度可根据 Biot-Savart 定理计算。根据 Biot-Savart 定理，如果导线无限长或 B-dot 探针环半径 $r_w<<l$，则载流直线激励产生的磁场强度 B 如式(12)所示，μ 为空间介质磁导率。

$$B=\frac{\mu I}{2\pi r_w} \tag{12}$$

B-dot 是一种小线圈，其体积很小，线圈截面半径一般在毫米量级。B-dot 结构简单，放置灵活，测量脉冲电流时，线圈不需要通过被测回路，因此与脉冲电流回路没有直接电气连接，也不会引入外部参数，因此很大程度上保证了被测设备的可靠性。不同于 Rogowski 线圈测量方法，B-dot 是一种非侵入式脉冲电流测量探针，不会对被测电流的电路和磁场造成很大干扰。由于很大程度上保证了被测设备的可靠性，B-dot 被广泛应用于等离子体内部磁场和磁绝缘传输线的测量以及线性感应加速器等脉冲电流测量。文献[41]通过改进结构设计提升了上限频率，带宽可达 100 MHz~1 GHz。文献[42]在传统狭缝环的基础上，开发了 Moebius 环 B-dot 磁场传感器，性能进一步提升。与传统 Rogowski 线圈相比，B-dot 更适合对体积和回路参数有严格要求的应用。然而，对于千安级短脉冲电流，其产生的磁场强度小，均匀性差，测量磁场的脉冲电流难度较大。

1.2.3　磁阻效应式

近年来，随着半导体技术的进步，基于磁阻效应的电流传感器发展迅速。磁阻效应是指物质(铁磁金属和合金多晶)的电阻在磁场作用下发生变化的现象[43]。磁阻比定义为：

$$\Delta R/R_0=(R_\mathrm{H}-R_0)/R_0 \tag{13}$$

式中：R_0 为材料在零磁场下的电阻值；R_H 为材料在磁场下的电阻值；ΔR 是 R_0 和 R_H 之差。常见的磁阻包括各向异性磁阻(anisotropic magneto resistance，AMR)、巨磁阻 (giant magneto resistance，

GMR)和隧道磁阻(tunnel magneto resistance，TMR)。

AMR 是铁磁材料的电阻率随外界磁场和电流方向夹角改变而改变的现象。薄膜技术的发展引领了 AMR 材料的广泛应用，该元件可测量直流和交流磁场且功耗低，但线性范围窄，容易磁饱和[44]。GMR 元件由中间带隔离层的两层铁磁体组成，工作原理是利用具有巨磁阻效应的磁敏元件感应被测电流产生的磁场，对其输出的电压信号进行处理获得被测电流值，结构上一般设计为惠斯通电桥形式且元件的灵敏轴方向对磁场方向敏感。相比 AMR 元件，该元件灵敏度更高，测量范围更广，具有温度漂移低、响应速度快、集成方便等优势[45]。文献[46]研制的 GMR 电流传感器如图 12 所示，可实现 DC 至 10 MHz 带宽的测量。GMR 元件的测量幅度很大，但由于量程有限，不能同时覆盖从 kA 到 MA 的范围。同时消除外界杂散磁场影响造成的零偏置误差有一定难度，因此提高传感器分辨率还需进一步增强其检测能力。

TMR 的机理是基于自旋相关的隧穿效应，主要包括铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层这 3 层结构。当饱和磁化时，2 个铁磁层的磁化方向互相平行，但矫顽力不同，此时处于低阻态；当反向磁化时，矫顽力较小的铁磁层的磁化矢量首先进行翻转，使得 2 个铁磁层的磁化方向变为反平行，此时则处于高阻态。TMR 元件较前 2 者具有更高的温度稳定性，灵敏度和线性范围，可检测纳安培级电流。但该元件对测量位置敏感、电磁兼容性问题还需明晰，且受温度影响大，存在零点漂移等问题。表 2 总结了各种磁阻传感器的技术参数。

1.2.4 磁光效应式

法拉第磁光效应即光的偏振态会受磁场影响，通过该效应可以实现对外施磁场或电流的感知[47]，原理图如图 13 所示。

目前，基于磁光效应的电流传感器从拓扑结构上可分为全光纤和玻璃光学两类。全光纤式通过光纤的偏振特性，利用旋转角间接测电流。其结构单一，灵敏度高，测量范围广，适用于长距离传输。文献[48]利用 Sagnac 结构使传感器动态范围提升 3 个量级。文献[49]通过改进光路结构降低噪声电平，提高了传感器灵敏度。文献[50]提出的反射型结构较 Sagnac 型降低了光纤对外界振动因子的灵敏度，避免了陀螺效应，具有更高的温度稳定性、带宽高于兆赫兹[51]。然而，限制此类传感器应用的主要因

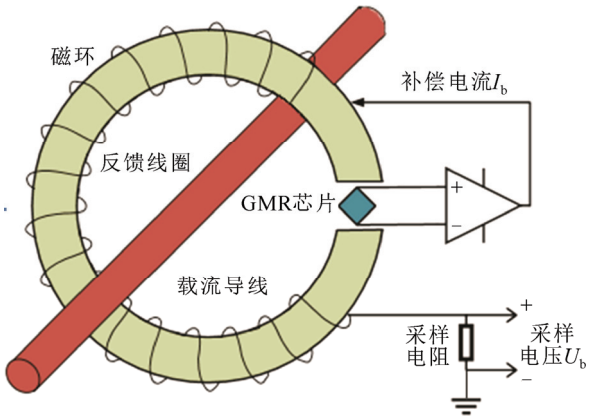


图 12 GMR 电流传感器示意图[46]

Fig.12 Schematic diagram of the giant magnetic resistance current sensor[46]

表 2 磁阻传感技术参数对比[3]

Table 2 Comparison of technical parameters of magnetic resistance sensing[3]

类型	灵敏度/((mV/V)/GS)	磁场工作范围/Oe	分辨率/mOe	温度特性/℃
AMR	1	0.01~10	0.1	<150
GMR	3	0.1~30	2	<150
TMR	20	0.001~200	0.1	<200

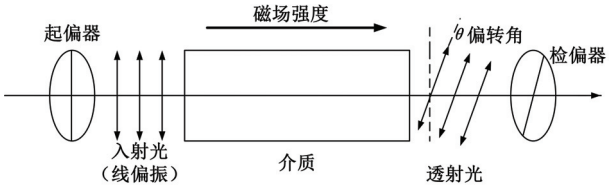


图 13 法拉第效应原理图

Fig.13 Schematic diagram of Faraday effect

素是其长期稳定性。玻璃光学类通过测量输出线偏振光的法拉第旋转角间接测量电流[52]。与全光纤电流传感器相比，玻璃光学类电流传感器具有更小的尺寸，更高的机械硬度，更好的稳定性，且受线性双折射影响更小。文献[53]通过改进磁光玻璃材料，使得测量误差在 0.2%之内；文献[54]提出自愈式光学电流互感器并成功挂网运行。文献[55]研制的传感器测试范围为 5~50 kA，误差小于 1%。但磁光效应类电流传感器进行加工时，很难保持外形结构的完整性，且传感单元结构复杂、光学元件使用困难，还存在易碎、成本高等缺点。

以上是电力系统中基于不同原理的雷电暂态过电流测量方法，表 3 总结了各种传感器的带宽和优缺点。

表 3　电流/磁场传感器的性能比较

Table 3　Performance comparison of current/magnetic field sensors

传感器类型	频带/Hz	优点	缺点
Rogowski 线圈[39]	数百兆	线性度好；安装方便；非接触	不能测直流和小电流，对被测电流位置敏感
B-dot[41]	1 G	原理简单、频带宽，稳定性良好	对原磁场影响大
磁阻效应[46]	0~10 M	体积小、灵敏度高、测量范围广	对外界磁场干扰敏感，磁滞饱和
磁光效应[3]	0~100 M	抗干扰强、安全性高	温漂大、价格昂贵

2　基于先进传感器的监测技术

雷电暂态监测技术是一种用于感知、记录和分析暂态电压电流的综合性技术。通过在电力设备或线路上部署监测装置，捕捉雷电暂态过程，便于及时采取措施保护电力系统设备，防止雷击损坏和事故发生。本章简要概述器件微型化、时间同步、通信以及供能等关键监测技术。

2.1　传感器微型化技术

微型化技术可实现电压、电流传感器件的批量化、一体化制造，形成体积小、重量轻、性能高的微型传感器及其测试系统，该技术的主要流程包括光刻、剥离、刻蚀、氧化、扩散、注入、溅射、蒸馏、薄膜沉积等[56]。清华大学、中科院电子所、重庆大学、日本东电公司和瑞士 ABB 等国内科研院所通过微型化技术研制了压电式、光电式和电荷感应式等 MEMS 传感器。

文献[57]对硅进行深反应离子刻蚀，传感器制作工艺如图 14 所示，制备了一种具有高灵敏度和高性能的 MEMS 传感器，实验测试表明，在 0~50 kV/m 电场强度范围内，采用 1 V 交流驱动电压，电场传感器的灵敏度为 0.292 mV/(kV/m)，线性度为 2.89%。文献[58]采用铝丝键合技术和湿法刻蚀技术开发了由微磁通门和电流互感器组成的混合电流传感器，具备 DC 到 100 kHz 的平坦带宽，在小电流范围内非线性小于 2%。典型 MEMS 器件的尺寸为 1 μm~1 cm，可以与处理电路和控制电路同时集成在同一块芯片上，利用成熟的半导体加工线重复、高效和低成本加工。因此面向未来规模不断扩大的雷电暂态分布式感知需求，大规模生产微型化传感器有助于构建全面覆盖、无缝衔接、即插即用的传感网络。

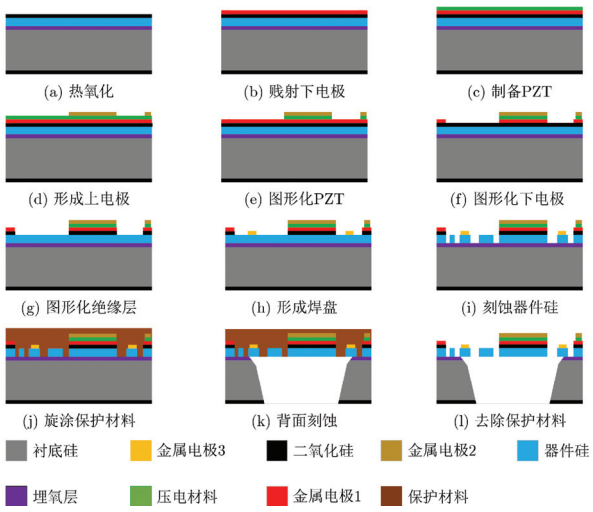


图 14　传感器制造工艺流程[57]

Fig.14　Sensor fabrication processes[57]

2.2　传感时间同步技术

在雷电测量中，传感器时间同步的精度直接影响雷击故障定位的准确性，1 μs 的误差将会导致 200~300 m 的位置不确定性，因此时间同步技术对于精准定位雷击故障至关重要。时间同步模型分为外部时针和内部时针 2 种[59]。外部时针同步模型采用物理时针，利用无线接收设备从标准时间信号源接收时间，如全球定位系统(global position system，GPS)[60]。内部时针同步模型则采用逻辑时间，通过部分或全部时间信息为每个时间计算修正值[61]。美国基于 GPS 研发制造了 Vutos 型的雷电定位及监测系统，仅在 2018 年就成功定位和监测了超过 40 000 次雷电袭击，并与加拿大形成联网[62]。英国采用全新的第 3 代雷电定位算法，将雷电信号监测系统、雷电灾害定位系统、雷电监测网三网融合，形成的雷电定位平台能够实现 III 级以上雷电袭击的 100%精度定位，对于 III 级及以下的雷电袭击，其定位精度可达 95%左右[63]。国内雷电定位系统已覆盖 80%的国网辖区，算法已达第 3 代定位水平[64]。然而，目前国内大多数雷电监测和定位系统的雷电定位精度还需进一步提升，研发更为准确、合理的雷电定位算法[65]。中国利用北斗定位芯片产生的 1PPS 脉冲信号可以获取纳秒级别的时间戳，经过算法的修正，定位精度有质的飞跃，未来有望满足电网时间基准统一的迫切需求[66]。

2.3　传感器通信技术

传感监测装置采集到的雷电暂态信号利用通信技术传输到中央数据处理中心，经数据分析后可

用于故障识别和定位及一些特定场景中。现有的通信技术主要分有线和无线两种。有线通信包括电力特种光缆、光纤通信等，具有传输信号稳定可靠、安全性高和低延迟的特点，文献[67]基于光学效应设计的多点电压传感系统如图 15 所示，通过光纤完成信号传输，实现高精度电压测量。但存在部署维护成本高、偏远地区难以覆盖等问题，限制了其灵活性、可扩展性和多址特性，不适合广泛多点部署[68]。

与有线通信相比，无线通信具有灵活性高、多节点接入、低成本、强互操作性等特点，典型的无线通信包括红外、超声波、射频识别(radio frequency identification, RFID)、Wi-Fi 和蓝牙/Zigbee 通信等。其中红外通信技术适用于低成本、跨平台、点对点的高速数据连接[69]。超声波可在各种介质中传播，且传播距离足够远[70]。RFID 无需人工干预，可自动识别目标信息并获取相应的数据[71]。WiFi 无线通信接入网络设备终端的通信速率在 300 MB/s[72]。蓝牙支持其设备之间的数据和语音通信，具有相对安全的技术优势[73]。ZigBee 因具备功耗低的特点，适用于结构简单的无线传感网络。无线通信更适合应用于分布式雷电暂态监测装置的信号传输，同时有助于实现以分布式雷电暂态传感为特征的电力系统基础设施建设，实现可观察、可分析、可预测、可控的电力系统，并赋予电力系统以传感器网络为驱动的控制和调度机制，促进海量信息交互和流动。

2.4 传感器供能技术

目前，监测设备供电方式主要包括蓄电池供电、传输供电以及自取能供电[74]。然而蓄电池容量的发展滞后于设备需求，为保证监测装置长期稳定运行需增加容量，从而增加了装置的体积和重量[75]。此外，监测装置往往处于恶劣环境中，因电池更换造成的停电会进一步提高维护成本。传输供电方式包括激光传输、微波传输和耦合磁共振传输[76]，这些方式可实现高、低压系统的完全隔离，具有良好的绝缘性能。然而，现有的传输供电技术存在一些明显的技术短板。例如，激光传输供电设备寿命有限、维护成本高、转换效率低[76]；微波传输供电容易产生强烈的电磁辐射，可能影响传输路径上电气设备的正常运行[77]；耦合磁共振传输供电存在功率密度低、耦合系数低等缺点[78]。此外，所有传输供电装置均需要低压电源为变换器供电，成本较高，使用场景较为有限。自取能技术能够将环境中的其他形式能量转换为电能，为监测装置提供长期供电，从而极大降低运维成本[79]。自取能技术包括电场能和磁场能在内的电磁能量，以及太阳能、风能、温差能和震动能等自然能量。表 4 对各项自取能技术的优缺点进行了总结和对比。相比蓄电池供电和传输供电技术，自取能技术更适合为分布式、低功耗、微型化的海量电网状态监测装置提供供电。

3 基于雷电暂态波形信息的数据应用

基于监测系统获取的雷电暂态故障信息实测数据，可以为电力系统中一、二次设备的绝缘配合、

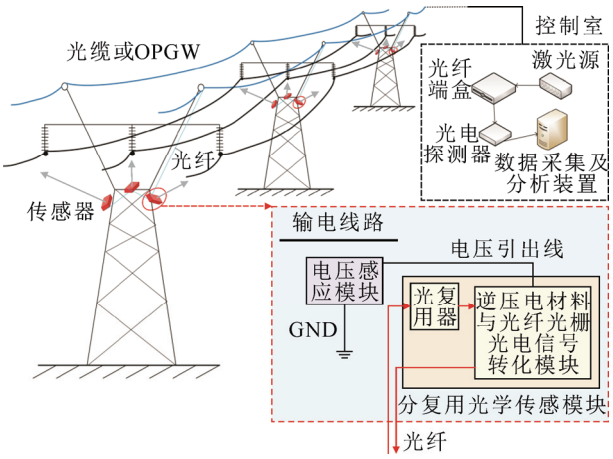


图 15 多点光电压传感系统在电网中的应用方案[67]

Fig.15 Application scheme of multi-point optical voltage sensing system in power grid[67]

表 4 能量类型及取能方法比较[74, 80]

Table 4 Comparison of energy types and energy extraction methods [74, 80]

能量类型	取能技术	功率密度	优点	缺点
磁场能	电流感应取能	150 μW/cm³	技术成熟，应用广泛；结构紧凑	存在供电死区和磁芯饱和，使用场景有限
	地线取能	0.1 W/m	输出功率大	可能影响绝缘安全，有雷击风险
电场能	电场感应取能	0.1~100 μW/cm³	输出稳定；结构简单；使用场景广泛	输出为交流小电流高容性阻抗
太阳能	光伏发电	20 mW/cm²	技术成熟，应用广泛；直流输出	输出受光照条件影响，体积大，需定期维护
风能	小型风力发电机	1 mW/cm²	技术成熟；可长期免维护	体积大，安装困难，起始风速受限，效率低
温差能	温差发电	10~100 μW/cm²	重量轻；可长期免维护；可靠性高	效率低，使用场景有限
震动能	压电发电机	300 mW/cm³	结构简单；取能来源广泛	压电材料易疲劳，容易充电泄漏，交流输出

防雷设计提供技术指导，因此有必要对数据进行长期的统计学分析。在此基础上，通过明晰雷电过电压与过电流特性，有助于为雷击识别与定位提供判断依据。因此本章将从雷击故障波形统计分析、雷击故障识别以及定位 3 个方面展开介绍。

3.1　雷击故障波形统计分析

3.1.1　雷电过电压

美国率先展开了对雷电过电压统计规律的研究，通用电气公司对不同电压等级的输电线路雷击事故进行了分析，然而，由于早期监测设备性能的限制，未能对具体的波形特征和故障机理做出深入的定性结论[81]。日本学者 Kunihiko Hidaka 采用非接触式感应电压技术和电光传感技术相结合的在线监测装置，成功获得了累积概率为 50%的波前、半波时间和峰值电压，分别为 5.9 μs、36 μs 和 240 kV。监测结果显示，波形特征受到测量位置和测量条件的影响，尽管各种实测波的分布相似，但作者并未对此进行进一步讨论[82]。

国内重庆大学、武汉大学等机构相继对雷电过电压波形进行了长期在线监测与统计分析。文献[15]研制的雷电过电压监测装置如图 16 所示，现已成功应用于配电网系统并成功捕获雷电引起的过电压信号，结果表明感应雷过电压振荡频率与接地有关，采用相同接地的 2 条被测线路感应雷过电压波形基本相同，电压波形均为双极性[83]，这为 10 kV 配网的绝缘配合、事故诊断和设备绝缘性能评估提供了可靠的技术方法。

文献[84]利用套管末屏过电压监测系统成功采集到直击雷、感应雷过电压等信号，数据表明直击 A 相的过电压波形与其余相感应电压极性相反，且感应幅值小于直击相，波前时间和陡度的分散性较大，揭示了站内设备遭受雷电过电压的幅值和波形参数分布规律。文献[85]通过实测雷电侵入波并进行分析，发现站内设备承受的雷电侵入波过电压波形与标准规定存在显著差别。感应雷击时，过电压同时作用于三相，相间电压相似度大；而雷电直击时，相间电压相似度较小，且反击和绕击过电压的初始行波差异较大。这为雷电过电压的监测和识别提供了重要参考。文献[86]通过实测发现感应雷过电压的多次回击呈现出波头时间短，到达峰值后双极性振荡，再转为低频振荡的特点。统计分析发现，雷电过电压具有高频、高峰值、能量丰富和空间分布不均匀等特性，雷电直击过电压三相相似度小，感应雷过电压三相高度相似，而绕、反击过电压总体变化趋势基本相同，且均含有大量高频成分，这为不同雷击故障过电压的识别提供了判别依据。

3.1.2　雷电过电流

国内外通过分析雷电流的振幅、频谱、波形等特征，揭示了雷电流在不同条件下的变化规律。图 17 为日本尼康公司将 Rogowski 线圈安装在高原风电场风机上的示意图，并成功监测了千安培级别的雷电流波形，为风机的防雷设计提供了参考依据[87]。

清华大学开发的雷电流波形监测装置成功捕捉到了我国首个与 CIGRE 推荐波形相似的雷电流波形[88]，为制定行业标准奠定了基础。文献[89]研制的雷电流在线监测系统采集到雷电流幅值 35 kA 的负极性雷，这些数据为评估雷电风险并采取保护措施提供了有价值的信息。文献[90]的统计分析发现，雷电流幅值频率分布特征随闪电极性而异，这对确定设备的脆弱区域并采取预防措施至关重要。相比之下，文献[91]研究表明，雷击故障电流具有更大的陡度，非故障相的电流行波也具有较大的暂态能量特点，这些特征信息为减少雷电引起的损坏

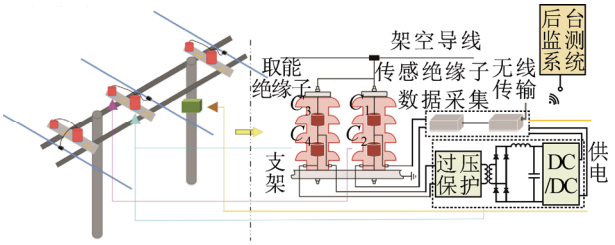


图 16　基于陶瓷电容分压的雷电过电压监测装置[15]

Fig.16　Principle of lightning induced over-voltage sensing system and capacitive voltage divider[15]

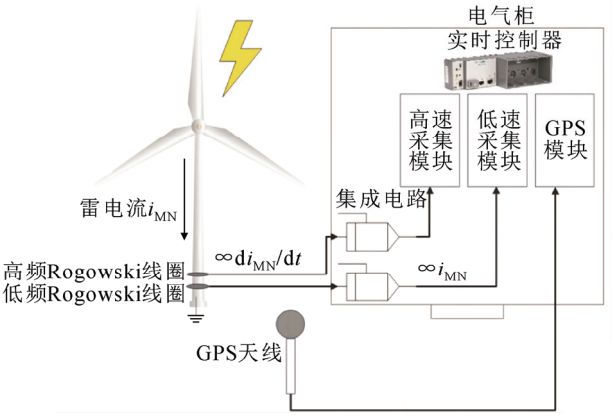


图 17　风力发电机雷电流测量系统[87]

Fig.17　Lightning current measurement system for wind turbines[87]

提供了指导。文献[92]发现感应雷过电压的三相电流行波为感应电流行波，而反击过电压的三相电流行波存在电磁耦合电流分量，绕击过电压没有电磁耦合电流的存在。文献[93]指出雷电流波形的振幅和能量主要集中在低频部分。文献[94]则发现反击雷的每相电流极性相同，而绕击相的雷电流行波极性与其他两相相反。文献[95]研究表明雷电流波形具有波前频率高、波尾频率低的特点。总结发现负极性雷的占比约为 90%，且近 50%有多次放电的特点。从雷击发生到结束，持续时间一般在 0.2 s 左右，具有短时性；波前时间在 1~5 μs 范围内，波长时间一般在 20~100 μs，上升和下降时间快；且具有幅值大、高频分量丰富及波形不规则的特性。综合而言，从大量的统计数据和研究成果中得知，雷电流的特征包括频率分布、波形特征、极性等方面的差异。这些特征对于评估雷电风险、确定设备脆弱区域及采取相应的保护措施具有重要意义。同时，针对不同的特征，科研人员提出各种不同的监测和分析方法，从而为雷电保护提供了多样化的技术手段。

3.2 雷击故障识别

3.2.1 雷击(故障性雷击与非故障性雷击)与非雷击识别

雷击与非雷击的主要区别在于暂态电压与电流的明显差异性，根据雷击强度对电力系统造成的影响可分为故障型雷击和非故障型雷击，未引起设备故障的雷击称为非故障性雷击，反之则为故障性雷击。为识别雷击与非雷击，研究者们进行了不同的探索和实验。常规情况下通过比较雷击前后电流变化量的大小即可实现雷击与非雷击的识别[96]。为提升识别效率，有学者利用改进的希尔伯特-黄变换算法结合高低频能量比值判据实现了雷击与非雷击的快速识别[97]。武汉三相研制的输电线路智能诊断系统依据暂态行波电流频率区分雷击故障和非雷击故障[98]，提高了诊断的准确性。在信号处理方面，科研人员通过小波变换和暂态信号中高低频分量能量比值对雷击未故障与故障情况进行识别[99]，为故障诊断提供了新的视角。文献[100]则通过建立仿真模型，利用波形一致性系数对故障性雷击与非故障性雷击进行辨识，拓展了识别方法的多样性。除此之外，文献[101]通过对电流故障信号进行波形分析和能量分布计算，发现不同类型雷击的暂态能量在频率上的集中情况，为雷击类型的识别提供了更多的信息。因此，基于雷击前后电压电流的大小以及暂态能量所在的频段，可以实现雷击与非雷击的区分，为故障诊断提供可靠的依据。

3.2.2 感应雷击与雷电直击识别

感应雷与直击雷均是电力系统中防范的重点，有效区分感应雷与直击雷可为不同电力设备的防雷设计提供合理的指导方法。有学者提出了一种通过分析暂态信号的零模线模比值来识别感应雷，但未涉及直击雷的识别[102]。相比之下，文献[103]采用时频域分析和小波分析等多种数学方法，结合提取的雷电过电压特征量，并利用模式识别结构实现直击雷和感应雷的快速、准确识别，其分类流程图如图 18 所示。为进一步区分感应雷与直击雷，文献[104]对输电线路中的 2 种雷击进行全面分析，发现感应雷作用下的线模量与地模量的差异以及重型和轻型直击雷的特征，为精准识别提供了更多判据。通过数值计算和特征分析拓展识别的范围是常见的技术方法，文献[105]提出了一种针对架空配电线路感应雷过电压的识别方法。在此基础上，文献[106]结合现场实际情况，提出利用神经网络算法构建输电线路感应雷与直击雷的辨识系统，实现了不同雷击类型的识别。基于直击雷高频分量幅值大，直击相极性与其他相相反的特性，结合感应雷三相极性高度相似的特点，可实现感应雷与直击雷的识别。然而，有研究结合变电站实测波形与仿真波形探索感应雷和直击雷的产生机理及波形特征，发现监测装置装设于变电站内部，雷电过电压经过复杂的折反射导致波形畸变，存在误判的问题[92]。因此在实际应用中，需要综合考虑各种因素，并结合多种识别方法以提高识别的准确率。

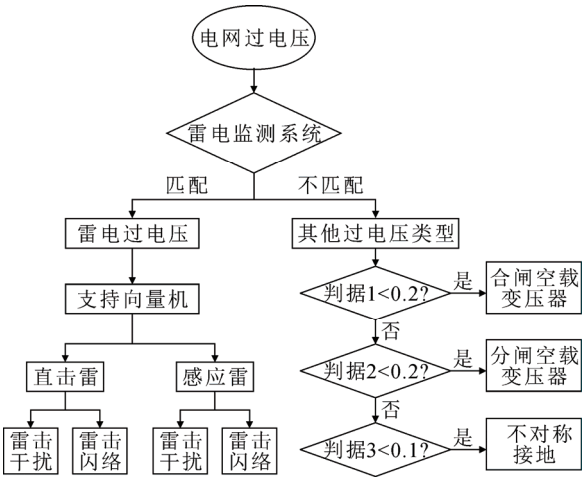


图 18 雷击故障类型的支持向量机分类流程图[103]

Fig.18 Flowchart of support vector machine classification of lightning strike fault types[103]

3.2.3　雷电绕击与雷电反击识别

国外早期依靠计算耐雷强度、建立杆塔几何模型来判断是否发生绕击、反击[107]。随着传感监测技术的进步，有学者通过监测雷电流参数识别绕击与反击，但该方法存在可重复性差、识别率低的问题[108]。为提升识别率，有研究通过零模电压浪涌极性变化来识别绕击与反击，然而该方法主要适用于直流输电线路，不适用于交流线路[109]。为了克服上述局限性，依据反击会有雷电流经过杆塔以及避雷线的特点，通过监测避雷线中的雷电流来对绕击和反击进行区分[110]。此外，文献[111]提出一种新方法，利用行波最开始的 2 个极大值的比值来表征绕击与反击，以此识别绕击故障与反击故障。为探究该方法在不同电压等级线路中的适用性，有学者对 1000 kV 等级线路的雷击识别进行了积极探索。文献[112]通过避雷器放电时间和过电压波头极性对 1000 kV 输电线路绕击与反击进行识别，研究表明发生反击时，避雷器放电时间较长且过电压波头极性为正，而发生绕击时，避雷器放电时间短且过电压波头极性为负。另外，文献[113]提出一种基于空间电磁耦合电流方法来识别绕击与反击，文献[114]通过数学形态谱高效区分绕击与反击。总体而言，目前针对雷击故障特征量提取的研究多针对于单一特征量，例如各相导线上的雷电过电压或雷电流，但雷击故障是复杂的物理过程，仅靠单一物理量难以完整反应其特征。同时针对高电压等级线路，研究多基于仿真层面，尚缺乏实际测量数据的验证。

3.2.4　基于人工智能技术的雷击故障识别

雷击故障识别通常需经历特征提取和分类 2 个阶段，传统的基于人工设计的特征提取方法结合逻辑规则或机器学习模型进行故障分类存在识别准确率低、可迁移性差、鲁棒性与可解释性不强等问题[115]。近年国内外在基于大数据的雷击故障识别方面开展了大量研究工作[116]。文献[117]搭建了一种基于稀疏自编码器的雷击过电压识别和分类框架，实现了雷击过电压波形的降维和自动特征提取，在识别不同雷击过电压中取得了良好的效果。在此基础上，文献[118]利用稀疏自编码器进行无监督特征学习，并将改进后的卷积神经网络加入其中，提出了新的故障检测和识别方法，该方法对噪声和测量误差具有较强的鲁棒性和较高的可推广性。为充分利用雷击故障的丰富特征信息，文献[119]提出 1 个基于卷积神经网络的集成模型，该模型以数据驱动的方式发现更多有用的故障信息，提高了识别的准确性且对数据污染的鲁棒性更强，同时实现了模型的可解释性。文献[120]应用 1 维卷积神经网络模型，通过对 5 万条数据的训练，实现了 97.5%的雷击故障识别准确率。为进一步提升识别准确率，文献[121]通过构建 5 层残差模块形成 1 维残差神经网络，对 11 万条数据进行训练后，雷击故障误判率低于 2%。因此随着电力系统测量装置的升级与新一代人工智能技术的发展，构建以人工智能技术和大数据分析为主体的雷击故障识别系统，是提升识别率的必然选择。然而，随着大数据时代的到来，处理海量的数据信息势必增加识别计算量，故提高识别计算效率是实现快速辨识的关键，也是当前亟需克服的难题。

3.3　雷击故障定位

3.3.1　电流行波定位

传统的雷电定位主要依靠站内监测设备，分布式监测则通过多点安装、灵活布置和就近测量的方式，克服了传统定位方法受互感器二次回路相移的局限性，解决了长线路定位精度差的问题，实现了 T 接线、多分支线路的有效测距。文献[122]沿输电线路选择多个监测点，将非接触式微分环测量装置安装在杆塔上，通过采集雷电流行波实现了对输电线路雷击点和闪络点的精确定位，定位误差均<0.4%，该测量方法能够为快速处置故障提供参考依据。针对行波波速变化、实际传输距离与档距的差异造成的行波定位误差。山大电力研制的基于非接触原理分布式行波故障定位及预警系统通过在线波速自适应方式解决了波速问题，利用全精度补偿方法使得时间同步差不大于 50 ns，实现了雷击点的准确定位[123]。文献[124]提出的分布式雷电定位监测方法，通过缩小计算区间提升了长距离线路故障定位的精度。文献[125]则通过在线路上直接获取故障电流原始行波，避免了长距离传输及经过站内 TA 及 TV 耦合造成的信号衰减，提升了监测的灵敏度，降低了整体定位误差。武汉三相开发的分布式故障诊断系统[98]和文献[126]通过比较行波浪涌的极性实现了对输电线路雷击故障的精准定位，解决了雷击暂态电流行波无方向性的问题。结合数值分析和人工智能方法也是提高雷击故障点检测的准确性与可靠性有效的措施。文献[127]提出一种基于最大似然卡尔曼滤波残差分析方法，提升了定位精度。另一方面，文献[128]针对配电网分支多、故障点信号弱的特点，提出了电流行波法和神经网络相结合的

方法来实现准确故障定位。总体而言，电流行波法是实现故障定位的重要方法之一，其定位精度较阻抗法和故障分析法高且不受环境影响，适用性也更强。分布式技术的运用使其具有更高的检测灵敏度、更好的定位精度，且受线路长度误差影响小，因此分布式电流行波法适应于跨区多、距离长的交直流输电线路雷击定位。然而，电流行波受电压峰值附近的影响导致信号弱，容易受到噪声干扰。特别是非雷击自然破坏情况下，电流行波幅值小，不易检测，故需考虑多种方法综合分析，提高定位精度。

3.3.2 电压行波定位

近年来，电磁时间反演(electromagnetic time reversal，EMTR)技术因不受噪声和行波波速的影响，且无需识别行波波头而被逐渐应用于电力系统雷击故障定位。文献[129]首次提出基于 EMTR 的雷击故障定位方法，并采用不同数量的传感器进行测试和验证，均取得良好的定位效果。文献[130]利用 2 维仿真模型，基于 EMTR 对比了最大场振幅、最大能量振幅和熵的局部最小值等不同判据的定位效果。同时发现该方法在使用相对较少数量传感器的情况下，能够实现比 LLS 更优的定位效果和更高的精度[131]。文献[132]提出了一种基于机器学习的 2 维雷击故障定位算法，该算法利用输电线路上预装的电压测量系统数据，在 100 km×100 km 范围内实现了雷击故障定位，且具有合理精度，然而该算法较理想化，未考虑多导线、屏蔽线等因素及损耗影响。为更贴近实际情况，文献[133]计及损耗因素，提出 3 种不同反演时间阶段模型，通过设置更精细的时间步长提升了雷击故障定位的精度。在考虑大地损耗情况的基础上，文献[134]进一步考虑场波在传播过程中的衰减情况，通过 3 维数值仿真模型验证了基于 EMTR 的雷击故障定位方法的准确性。此外，文献[135]提出的 EMTR 的电压行波法如图 19 所示，将其应用于复杂配电网络，实现了雷击故障的精准定位。基于 EMTR 的雷击故障定位方法不仅利用了电磁场到达时间的信息，还结合了场的振幅及整体波形信息，相比于 TDOA 具有更高的定位精度[136]。尽管基于 EMTR 的雷击故障定位方法需要额外安装电磁场传感器记录雷电电磁场的完整波形，但随着低成本、微型化监测装置的分布式部署，限制其应用的难题也得到解决。因此基于 EMTR 的电压行波法将在雷击故障定位中发挥积极作用，未来将其与电流行波定位法互为补充运用，可有效提升雷击故障的定位准确率。

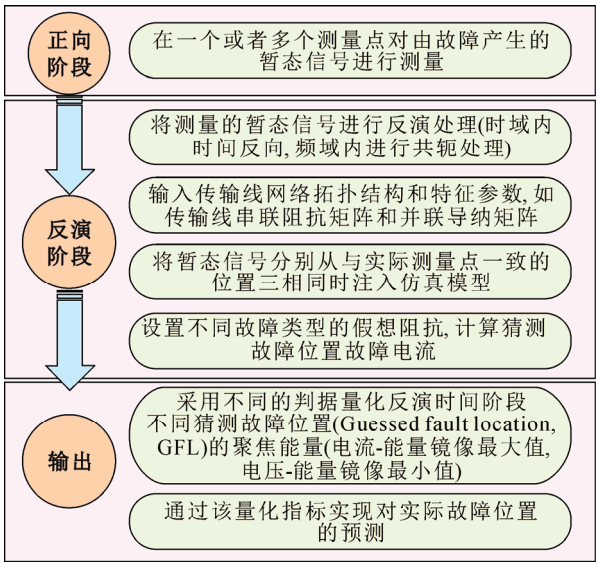


图 19 基于电磁时间反演的定位方法[135]

Fig.19 Localization method based on electromagnetic time inversion[135]

4 总结与研究展望

4.1 总结

雷电是造成电力系统故障的首要原因，实现对雷电暂态电压电流信号的感知、监测和数据应用对于维护系统安全稳定运行具有重要意义。本文从传感技术、监测技术和应用层面对现有研究成果进行了系统的梳理和总结。

1）本文针对雷电暂态电压电流信号呈现高幅值、宽频带特性，首先剖析了当前能够实现量测的传感技术原理及其优缺点。在电压测量领域，阻容式传感技术主要依赖于关键元件参数的变比进行测量，技术相对成熟，但主要用于 220 kV 及以下电压等级，且需要与待测对象直接连接，使得安装和维修不便。更为关键的是，阻容类传感器与总线或传输线的长时间电气连接将可能引发多种安全隐患。同时，在高压输电线路上实现测量也存在一定的困难。耦合电容式电压传感原理简单、应用广泛，然而耦合电容不易计算，导致测量精度不高。基于电流积分法的电压传感无需改变电网原有结构和接线方式，但获取波形的保真度还需提升。基于不同效应的电场传感技术具有成本低、易生产、可微型化等特点，但以电场为中间量对电压进行重构的方法还有待进一步研究。在电流测量方面，Rogowski 线圈在测量交流方面具有优势，其测量范围大，一

次侧和二次侧电气绝缘特性好且成本低，但对被测对象的位置敏感。当前新型电力系统的许多电流测量场景中，很难直接测量电流，通过测量磁场间接获取电流是一种有效手段。B-dot 磁场传感器主要用于高频和脉冲磁场测量，但容易受外界磁场环境的干扰，导致精度下降。基于磁阻效应的电流传感器具有体积小、性能高及成本低等综合优势，可用于测量直流和交流，其最有望适应能源互联网的发展，成为未来电网电流监测的有效工具。然而，磁阻传感器同样易受到外界磁场干扰，测量时需特别注意零漂移的影响。磁光效应电流传感器绝缘性能好，具有输入输出隔离、抗电磁干扰能力强、信号衰减小等优点。但在动态范围、抗振动干扰性、温度稳定性、结构复杂性、成本及长期稳定性等方面仍面临技术挑战。

2）本文基于不同原理的雷电暂态电压电流感知方法，对其构成的雷电暂态监测系统所涉及的关键技术进行了梳理。新型电力系统背景下要求监测装置在海量节点上分布式部署，因此对传感器提出了微型化、低功耗以及高性能等要求。目前微型化技术为传感器实现这一愿景和目标提供了解决方案。一方面，微纳加工技术能够实现敏感元件的小型化、批量化和低成本生产，且精度和灵敏度等性能在微纳尺度下得到提升。另一方面，敏感元件能够与集成电路兼容，通过在后端集成电路方面进行信号放大、补偿和校准等措施可进一步提升器件性能。针对广域测量和雷击故障定位等应用场景，要求海量监测装置的测量信号具有较高的时间同步精度，GPS 和北斗定位是目前较为主流的 2 种时钟同步方法，为提升其同步精度，已涌现出数十种具有代表性的同步算法。此外，为推动能源互联网之间的信息流动，完成数据处理与分析，通信技术成为构成传感器监测网络的核心技术。新型电力系统的通信架构实现了有线和无线通信技术的协同，其中有线通信主要适用于对信号质量要求高、安全有特殊需求的特定场合中，而无线通信更适用于多点部署的场景。在此基础上，监测装置长期稳定可靠的供能是实现现场应用的关键。目前，已有多种在现场切实可行的供电方式，例如蓄电池供电、基于电磁场取能的传输供电方式等。近年来，MEMS 振动能量收集器和摩擦纳米发电机等自供电技术的出现，为监测装置提供了更先进的解决方案。这些技术能够充分利用传感器工作环境中的中太阳能、风能、振动和热能等绿色能量，成为未来监测装置研究的重要方向。

3）本文基于监测装置获取的大量实测雷电暂态电压电流数据在电力系统中的应用进行了总结。统计学规律分析在电力系统雷击故障的研究中发挥着双重作用，一方面能够揭示导致电力系统发生直击、感应和绕击故障的典型特征，为不同雷击故障的定位和识别提供判断依据，对有效开展防灾减灾工作意义较大；另一方面，通过深入分析其产生机理和传播特性，可为提出合理的绝缘配合方案提供有力的数据支撑，对提升系统绝缘能力、降低雷击故障发生率具有重要意义。此外，基于统计学分析发现雷电暂态电压、电流均具有幅值大、高频成分多的特点，可依据不同故障的波形特征进行精准识别和定位，从而提高雷击故障处理的准确性和效率。现阶段，在雷击故障识别方面，主流的识别方法主要依托仿真结果进行判断，缺乏实测数据的支撑，同时用于识别的特征量有限容易导致识别率低。故建立 1 套识别率高、通用性强、鲁棒性高和可解释性好的雷击故障识别系统是提升系统自动化与智能化水平的必然要求。在雷击故障定位方面，定位精度在大范围线路上受到测量精度的限制，对于复杂的网络结构和多径传播情况，定位结果可能存在误差；受天气条件、地形和环境噪声等因素影响，定位结果不稳定。在实际应用中，需综合考虑多种定位方法，结合监测设备布置和现场实际情况，选择合适的定位策略，并对定位结果进行修正。随着电力系统分布式电源的大量接入，输电线路雷电过电压的特征量更加繁杂，因此传统的雷击故障类型识别方法和定位方法将面临严峻的挑战和诸多困难。

4.2　研究展望

针对电力系统中的雷电暂态感知、监测及应用情况，本文有以下几点展望，希望能够促进新型电力系统的建设与加速演进。

1）在传感技术层面，现有及在研的传感装置无法同时兼顾宽频带、大量程和微型化的需求。针对雷电暂态信号宽频带、高幅值的特征，传感器件将继续以拓宽频带范围、提升量程为导向向前发展。主要方向有 3 个：一是新理论，在现有物理效应的基础上开展新型耦合机制的技术研究；二是新结构，通过改进和设计新型拓扑结构提升传感器性能；三是新材料，突破当前传感材料在实际中遇到的瓶颈，发现和研制高性能传感材料。同时针对日益扩大的

电网规模，传感器应用于能源电力装备状态监测还面临 2 个关键问题：一是为实现对电力系统的可观、可测和可控，对设备状态信息的感知需求呈现指数型增长，传感器需要满足广域分布式部署的要求；二是缺陷故障往往出现在设备内部，传感器很难获取真实反映设备内部相关参量信息，严重制约了分析判断的有效性和准确性，传感器需要与待测设备进行共形融合设计。因此除提升性能以外，传感器未来还将向着微型化、集成化和智能化方向发展。

2）在监测技术层面，基于先进传感器的监测技术正经历巨大的变革和创新，其发展理念也呈现颠覆性的趋势。微型化技术的应用实现了敏感元件的批量化和低成本生产，同时良好的兼容性提升了集成化水平，然而器件加工与性能的一致性还有待提升。与此同时，时间同步技术正朝着更高精度和更大网络规模方向发展，降低成本、细化链路延迟模型，并降低网络的复杂性成为关键课题。当前通信技术逐渐从有线模式向无线传输和信息负载方向转变，未来物联网技术的发展将加速推动无线通信的应用。尽管供能技术呈现多种方式，但监测系统供电依旧面临两大挑战：一是现有供能技术在功率密度和可靠性上还需提升；二是监测装置的功耗普遍较高。因此，开发微功耗监测系统并实现多种供电方式的协同互补，成为提升供电可靠性的重要策略。

3）在应用层面，大数据和人工智能技术的兴起推动了人工神经网络、支持向量机和基于模糊逻辑等方法在雷击识别与定位领域的应用。在识别层面，未来的主流趋势是将提取算法与雷击故障关联数据相结合，以实现故障特征的有效提取，并通过智能算法实现雷击故障类型的准确识别。在定位层面，将分布式电压行波与电流行波相结合，以实现对不同故障类型的精准定位。随着大数据时代的到来，数据挖掘技术应用到电网监控系统已成为必然趋势，未来将不仅仅局限于雷击故障识别与定位，还将扩展至电力系统安全稳定评估、故障分析及状态检测预警等领域，作为弥补传统分析技术的新模式，将逐渐贯穿于电网各个环节中。在电力系统运行状态越来越多变难测的形势下，电力数据的应用为解决一些传统问题提供新的思路，势必也将创造无可估量的经济价值。

参考文献 References

[1] 杨 庆，张新东，孙 健，等. 10 kV 配电线路感应雷过电压波形特征实测分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(24)：8900-8909.
YANG Qing, ZHANG Xindong, SUN Jian, et al. Waveform analysis on characteristics of lightning induced overvoltages on 10 kV overhead distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8900-8909.

[2] 杨 庆，董富宁，罗曼丹，等. 宽频电压感知方法及其数据应用[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1969-1983.
YANG Qing, DONG Funing, LUO Mandan, et al. Wideband voltage sensing methods and sensing data applications[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1969-1983.

[3] 杨 庆，孙尚鹏，司马文霞，等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术，2019，45(2)：349-367.
YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.

[4] HE J L, HAN Z F, HU J. Advanced sensors towards ubiquitous power Internet of things[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(3): 871-890.

[5] 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.

[6] 盛戈皞，钱 勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.

[7] KHALID H, SHOBOLE A. Existing developments in adaptive smart grid protection: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191: 106901.

[8] 董旭柱，谌立坤，王 波，等. 电力定制化芯片应用场景及关键技术展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(14)：5017-5033.
DONG Xuzhu, CHEN Likun, WANG Bo, et al. Application scenario and key technology prospect of power specific integrated circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5017-5033.

[9] 李 鹏，毕建刚，于 浩，等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3097-3113.
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.

[10] 韦思宇. 架空配电线路电弧故障电磁辐射特性及定位方法研究[D]. 重庆大学，2022.
WEI Siyu. Research on electromagnetic radiation characteristics and location method of arc fault on overhead distribution line[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022.

[11] 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.

[12] CAO L, WANG Z Z, YUE Y G. Analysis and prospect of the application of wireless sensor networks in ubiquitous power internet of things[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 9004942.

[13] STRASSER T, ANDRÉN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2424-2438.

[14] 邓凌潇. 基于电场耦合原理的自构电场式电压传感器研究[D]. 重庆：重庆大学，2019.
DENG Lingxiao. The research of a self-constructed electric field volt-

age sensor based on the theory of electric field coupling[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.

[15] 尹　露. 基于陶瓷电容绝缘子的配电网感应雷过电压监测方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2019.
YIN Lu. Measurement of lightning-induced overvoltage in power distribution lines using ceramic-capacitor insulator[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.

[16] 张　晋，黄海波，梁基重，等. 用于过电压监测的变压器套管末屏电压传感器的研制[J]. 变压器，2011，48(3)：43-46.
ZHANG Jin, HUANG Haibo, LIANG Jizhong, et al. Development of transformer bushing end shield voltage sensor for monitoring overvoltage[J]. Transformer, 2011, 48(3): 43-46.

[17] 司马文霞，兰海涛，杜　林，等. 套管末屏电压传感器响应特性研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(21)：172-176.
SIMA Wenxia, LAN Haitao, DU Lin, et al. Study on response characteristic of voltage sensor mounted at the tap of transformer bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 172-176.

[18] 文　艺，李建明，李　淳. 500 kV 电网过电压在线监测装置的设计与分析[J]. 电测与仪表，2013，50(11)：92-95，114.
WEN Yi, LI Jianming, LI Chun. Design and analysis of overvoltage on-line monitoring device for 500 kV power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11): 92-95, 114.

[19] JAYARAM S, XU X Y, CROSS J D. High-divider-ratio fast-response capacitive dividers for high-voltage pulse measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 920-922.

[20] 聂一雄，孙丹婷. 阻容分压型电压互感器的性能分析[J]. 变压器，2007，44(1)：9-14，28.
NIE Yixiong, SUN Danting. Characteristic anlaysis of resistive-capacitive divider voltage transformer[J]. Transformer, 2007, 44(1): 9-14, 28.

[21] ZHENG J C, LI B, ZHA K P, et al. Equipotential shielding voltage sensor for contact measurement of transient voltage in EHV/UHV power grids[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 291-301.

[22] ZHENG J C, LI B, DONG W, et al. Design of an equipotential shielding 1000 kV capacitor voltage transformer[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 419-426.

[23] 杜　林，黄　旭，司马文霞，等. 基于容性设备泄漏电流的电网电压分频测量方法分析[J]. 高电压技术，2012，38(6)：1307-1312.
DU Lin, HUANG Xu, SIMA Wenxia, et al. Analysis on power grid voltage frequency measurement method based on leakage current of capacitive equipment[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1307-1312.

[24] 高　参. D-dot 电压传感器设计与三相电压测量系统研究[D]. 重庆：重庆大学，2015.
GAO Can. Design of D-dot voltage sensor and research on the measuring system of three-phase voltage[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.

[25] ZHAO P C, WANG J G, WANG Q, et al. Simulation, design, and test of a dual-differential D-dot overvoltage sensor based on the field-circuit coupling method[J]. Sensors, 2019, 19(15): 3413.

[26] 李长胜，崔　翔，李宝树，等. 光纤电压传感器研究综述[J]. 高电压技术，2000，26(2)：40-43.
LI Changsheng, CUI Xiang, LI Baoshu, et al. A review of optical potential transducers[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 40-43.

[27] CECELJA F, BORDOVSKY M, BALACHANDRAN W. Lithium niobate sensor for measurement of DC electric fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 465-469.

[28] 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.

[29] MEIER T, KOSTRZEWA C, PETERMANN K, et al. Integrated optical E-field probes with segmented modulator electrodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1497-1503.

[30] YANG Q, HE Y X, SUN S P, et al. An optical fiber Bragg grating and piezoelectric ceramic voltage sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(10): 105005.

[31] IHORI H, UJIKE M, HIROMOTO K, et al. Time series measurements of electric field vector mapping in a dielectric liquid[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(7B): L861.

[32] ZENG X J, WANG T T, YANG Q, et al. Voltage sensor utilizing inverse piezoelectric effect and fiber grating[C]//Proceedings of the 2nd International Electrical and Energy Conference. Beijing, China: IEEE, 2018: 397-400.

[33] WU X M, HUANG J A. A sensitivity-enhanced electric field sensor with electrostatic field bias[C]//Proceedings of 2017 IEEE SENSORS. Glasgow, UK: IEEE, 2017: 1-3.

[34] 吴文辉，曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.
WU Wenhui, CAO Xianglin. Power system electromagnetic transient calculation and EMTP application[M]. Beijing, China: China Water & Power Press, 2012.

[35] 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.

[36] 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.

[37] DRAXLER K, STYBLIKOVA R. Magnetic shielding of Rogowski coils[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(5): 1207-1213.

[38] YANG F, DU L, WANG D S, et al. A novel self-powered lightning current measurement system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2745-2754.

[39] FUSIEK G, NELSON J, ORR P, et al. Frequency characterisation of an optically-interrogated Rogowski coil for smart grid protection applications[C]//Proceedings of 2015 IEEE SENSORS. Busan, Korea (South): IEEE, 2015: 1-4.

[40] HE J J, GUO R. Measurement of arc velocity in an arc-rotating pulsed power switch based on B-dot probes[C]//Proceedings of 2009 IEEE Pulsed Power Conference. Washington, USA: IEEE, 2009: 658-662.

[41] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 8-13.

[42] BROWN C G, CLANCY T J, EDER D C, et al. Analysis of electromagnetic pulse (EMP) measurements in the National Ignition Facility's target bay and chamber[J]. EPJ Web of Conferences, 2013, 59: 08012.

[43] VIDAL E G, MUÑOZ D R, ARIAS S I R, et al. Electronic energy meter based on a tunnel magnetoresistive effect (TMR) current sensor[J]. Materials, 2017, 10(10): 1134.

[44] BERNIERI A, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. An AMR-based three-phase current sensor for smart grid applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7704-7712.

[45] 胡　军，赵　根，常文治，等. 基于隧穿磁阻效应的多点电晕放电磁场传感及定位[J]. 高电压技术，2018，44(3)：1003-1008.
HU Jun, ZHAO Gen, CHANG Wenzhi, et al. Measurement and location of multiple corona discharges based on tunneling magnetoresistive sensors[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 1003-1008.

[46] 胡　军，赵　帅，欧阳勇，等. 基于巨磁阻效应的高性能电流传感器及其在智能电网的量测应用[J]. 高电压技术，2017，43(7)：2278-2286.
HU Jun, ZHAO Shuai, OUYANG Yong, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in smart grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2278-2286.

[47] LASSING H S, OOMENS A A M, WOLTJER R, et al. Development of a magneto - optic current sensor for high, pulsed currents[J]. Review of Scientific Instruments, 1986, 57(5): 851-854.

[48] NICATI P A, ROBERT P. Stabilised current sensor using Sagnac interferometer[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(8): 791.

[49] LIN H, LIN W W, CHEN M H. Modified in-line Sagnac interferometer with passive demodulation technique for environmental immunity of a fiber-optic current sensor[J]. Applied Optics, 1999, 38(13): 2760-2766.

[50] SASAKI K I, TAKAHASHI M, HIRATA Y. Temperature-insensitive Sagnac-type optical current transformer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2463-2467.

[51] ZHOU S, ZHANG X P. Simulation of linear birefringence reduction in fiber-optical current sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19): 1568-1570.

[52] MA X Y, LUO C M. A method to eliminate birefringence of a Magneto-optic AC Current Transducer with glass ring sensor head[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1015-1019.

[53] NIEWCZAS P, MICHIE W C, MADDEN W I, et al. Field evaluation of FR5 glass optical current transducer[C]//Proceedings of SPIE 4074, Applications of Optical Fiber Sensors. Glasgow, UK: SPIE, 2000.

[54] 于文斌，江　波，张国庆，等. 自愈光学电流互感器现场运行稳定性试验[J]. 电力自动化设备，2012，32(4)：44-48，53.
YU Wenbin, JIANG Bo, ZHANG Guoqing, et al. Experiment on site operational stability of optical current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 24(4): 44-48, 53.

[55] INOUE N, TSUNEKAGE T, SAKAI S. Fault section detection system for 275 kV XLPE-insulated cables with optical sensing technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1148-1155.

[56] RHOD E, PETER C, HASENKAMP W, et al. Magnetic and thermal evaluation of a magnetic tunneling junction current sensor package[J]. Journal of the Microelectronics and Packaging Society, 2016, 23(4): 49-55.

[57] 雷虎成，夏善红，彭春荣，等. 基于锆钛酸铅的低电压驱动 MEMS 电场传感器研究[J]. 电子与信息学报，2023，45(1)：150-157.
LEI Hucheng, XIA Shanhong, PENG Chunrong, et al. Research on MEMS electric field sensor with low driving voltage based on lead zirconate titanate[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(1): 150-157.

[58] 赵兴海，李玉萍，郑英彬，等. RF MEMS 电容式开关结构层释放技术[J]. 传感技术学报，2012，25(3)：322-325.
ZHAO Xinghai, LI Yuping, ZHENG Yingbin, et al. Research on release of structure layer for RF MEMS capacitive switches[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(3): 322-325.

[59] LUO B. Distributed clock synchronization for wireless sensor networks[D]. Hongkong, China: Hongkong University, 2014.

[60] SCHWARTZ C C, PODRUZNY S, CAIN S L, et al. Performance of spread spectrum global positioning system collars on grizzly and black bears[J]. Journal of Wildlife Management, 2009, 73(7): 1174-1183.

[61] 吴　杰. 无线传感器网络时间同步算法研究[D]. 天津：天津大学，2015.
WU Jie. Research on time synchronization algorithm in wireless sensor networks[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2015.

[62] 邓阿妹，魏　凤，牟乾辉. 基于专利分析的电网雷电防护技术发展研究[J]. 高压电器，2019，55(9)：78-85.
DENG Amei, WEI Feng, MU Qianhui. Research on development of lightning protection technology for power grid based on patent analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 78-85.

[63] RAMACHANDRAN V, PRAKASH J N, DEO A, et al. Lightning stroke distance estimation from single station observation and validation with WWLLN data[J]. Annales Geophysicae, 2007, 25(7): 1509-1517.

[64] 孙　婵，徐国强. 闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验[J]. 大气科学，2019，43(1)：131-141.
SUN Chan, XU Guoqiang. Application of lightning location and radar data in cloud analysis system and numerical experiments[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 131-141.

[65] MOHAJERYAMI D, DOOSTAN M. Including surge arresters in the lightning performance analysis of 132 kV transmission line[C]//Proceedings of 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Dallas, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[66] 华国环，舒　梁，张文锋，等. 基于北斗卫星和 STM32F407 的雷电监测系统设计[J]. 传感技术学报，2022，35(9)：1282-1286.
HUA Guohuan, SHU Liang, ZHANG Wenfeng, et al. Design of lightning monitoring system based on Beidou satellite and STM32F407[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(9): 1282-1286.

[67] HE Y X, YANG Q, SUN S P, et al. A multi-point voltage sensing system based on PZT and FBG[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105607.

[68] 童维军，杨　晨，刘彤庆，等. 光纤传感用新型特种光纤的研究进展与展望[J]. 光电工程，2018，45(9)：180243.
TONG Weijun, YANG Chen, LIU Tongqing, et al. Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 180243.

[69] 于小强，杨　晖，杨海马，等. 基于红外通信的无线传感节点在漏缆检测中的应用[J]. 传感技术学报，2014，27(1)：149-152.
YU Xiaoqiang, YANG Hui, YANG Haima, et al. Wireless sensor node based on infrared communication in leaky cable detection[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1): 149-152.

[70] LI Y, CUI J, LI G, et al. An optimal design method for improving the efficiency of ultrasonic wireless power transmission during communication[J]. Sensors, 2022, 22(3): 727.

[71] BOONSONG W, ISMAIL W, YAACOB M S. Link quality of wireless household energy meter with an embedded RFID in LOS indoor environment[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 97(3): 3847-3860.

[72] ZHAO H T, SHUANG Y, WEI M L, et al. Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity Wi-Fi signals[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3926.

[73] ALAM M M, AZIM R, MEHEDI I M, et al. A low-profile planar monopole antenna for ISM/IMT/Bluetooth/Zigbee/WiFi/WiMAX/WLAN wireless communication applications[J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34(17): e4993.

[74] 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.

[75] RAMADASS Y K, CHANDRAKASAN A P. A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup

voltage[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(1): 333-341.

[76] MATSUURA M, TAJIMA N, NOMOTO H, et al. 150 W power-over-fiber using double-clad fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 401-408.

[77] 林先其，许冬冬，曾姜杰，等. 微波输能技术的研究进展及发展趋势分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版)，2017，9(1)：34-45.
LIN Xianqi, XU Dongdong, ZENG Jiangjie, et al. Research progress and development trend of microwave energy transfer technology[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(1): 34-45.

[78] 蔡　进，吴旭升，孙　盼，等. 磁耦合无线电能传输技术研究进展及其大功率实现方法[J]. 海军工程大学学报，2021，33(5)：19-27.
CAI Jin, WU Xusheng, SUN Pan, et al. Research progress of magnetic coupling wireless power transmission technology and its high power realization method[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2021, 33(5): 19-27.

[79] SHAIKH F K, ZEADALLY S. Energy harvesting in wireless sensor networks: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1041-1054.

[80] MENÉNDEZ O, CHEEIN F A, RODRÍGUEZ J. Displacement current-based energy harvesters in power grids: topologies and performance evaluation[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2022, 16(3): 52-66.

[81] LEWIS W W, FOUST C M. Lightning investigation on transmission lines-II[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1931, 50(3): 1139-1146.

[82] OKABE S, TAKAMI J, TSUBOI T, et al. Discussion on standard waveform in the lightning impulse voltage test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 147-156.

[83] ZHANG Y, YANG Q, XIE S J, et al. Mechanism and application of arrester block voltage division to lightning transient voltage monitoring in substation transformers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3): 689-696.

[84] 杜　林，李　欣，司马文霞，等. 110 kV 变电站过电压在线监测系统及其波形分析[J]. 高电压技术，2012，38(3)：535-543.
DU Lin, LI Xin, SIMA Wenxia, et al. Overvoltage on-line monitoring system for 110 kV substation and its waveforms analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 535-543.

[85] 司马文霞，张煌竟，杨　鸣，等. 某变电站 10 kV 系统实测雷电侵入波过电压幅值与波形特征统计分析[J]. 高电压技术，2021，47(1)：214-222.
SIMA Wenxia, ZHANG Huangjing, YANG Ming, et al. Statistical analysis of the amplitude and waveform characteristics of intrusive lightning overvoltages measured from the 10 kV system of a substation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 214-222.

[86] 王建国，王守鹏，蔡　力，等. 10 kV 运行配电线路雷电感应过电压波形在线监测[J]. 电机与控制学报，2021，25(1)：1-7.
WANG Jianguo, WANG Shoupeng, CAI Li, et al. On-line monitoring of lightning induced voltage waveform on 10 kV distribution lines[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 1-7.

[87] MIKI M, MIKI T, WADA A, et al. Observation of lightning flashes to wind turbines[C]//Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection. Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 1-7.

[88] 陈水明，何金良，曾　嵘. 输电线路雷电防护技术研究(一)：雷电参数[J]. 高电压技术，2009，35(12)：2903-2909.
CHEN Shuiming, HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning protection study of transmission line, part Ⅰ: lightning parameters[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2903-2909.

[89] 朱时阳，周文俊，邓雨荣，等. 可记录多重雷击的雷电流波形在线监测装置研制[J]. 高电压技术，2013，39(11)：2699-2705.
ZHU Shiyang, ZHOU Wenjun, DENG Yurong, et al. Lightning current monitoring system for recording multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2699-2705.

[90] 李家启，王劲松，廖瑞金，等. 重庆库区地貌 1999—2008 雷电流幅值频率分布特征[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1123-1128.
LI Jiaqi, WANG Jingsong, LIAO Ruijin, et al. Distribution characteristics of the lightning current amplitude and frequency in Chongqing reservoir landform during 1999-2008[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1123-1128.

[91] 郭宁明，覃　剑，陈祥训. 雷击对行波故障测距的影响及识别[J]. 电力系统自动化，2008，32(5)：76-79.
GUO Ningming, QIN Jian, CHEN Xiangxun. Lighting strike identification and its effects on the traveling wave fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 76-79.

[92] 戴　斌. 多方法融合的电力系统过电压分层模式识别研究[D]. 重庆：重庆大学，2010.
DAI Bin. The study of multi-levels power system overvoltage recognition based on manifold methods[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2010.

[93] 陈绍东，王孝波，李　斌，等. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. 气象，2006，32(10)：11-19.
CHEN Shaodong, WANG Xiaobo, LI Bin, et al. Frequency spectrum of standard lightning currents and its application[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(10): 11-19.

[94] 杨　帅，邹建明，喻剑辉，等. 输电线路与引雷塔雷电监测与雷电流波形分析[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1536-1540.
YANG Shuai, ZOU Jianming, YU Jianhui, et al. Electrical monitoring and lightning current waveform analysis of transmission lines and leading mines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1536-1540.

[95] 刘　璐. 输电线路雷电流测量用电流互感器应用研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
LIU Lu. Applied research on current transformer for measuring lightning current based on transmission lines[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2017.

[96] 刘兴茂，林　圣，李小鹏，等. 利用基波电流相量变化率识别行波保护中雷击干扰[J]. 电力自动化设备，2015，35(2)：55-61.
LIU Xingmao, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Apply fundamental current phasor change rate to identify lightning disturbance to travelling wave protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 55-61.

[97] 宋晓星，高艳丰，丁光彬，等. 输电系统雷击干扰与故障类型识别研究[J]. 电瓷避雷器，2021(1)：96-102，110.
SONG Xiaoxing, GAO Yanfeng, DING Guangbin, et al. Lightning strike interference and fault identification of transmission system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 96-102, 110.

[98] 彭向阳，钱冠军，李　鑫，等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术，2012，38(8)：1965-1972.
PENG Xiangyang, QIAN Guanjun, LI Xin, et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1965-1972.

[99] 王　钢，李海锋，赵建仓，等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报，2004，24(4)：139-144.
WANG Gang, LI Haifeng, ZHAO Jiancang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.

[100] 司大军，束洪春，陈学允，等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(7)：64-69.

SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69.

[101] 段建东，任晋峰，张保会，等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(23)：7-13.
DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 7-13.

[102] 郭良峰. 基于遗传算法的电力系统过电压分层模糊聚类识别[D]. 重庆：重庆大学，2009.
GUO Liangfeng. The hierarchical fuzzy clustering analysis for power system over-voltage recognition based on genetic algorithm[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2009.

[103] 杨　庆，赵洪彬，司马文霞，等. 基于阈值判断和支持向量机的电网实测过电压识别[J]. 高电压技术，2016，42(10)：3188-3198.
YANG Qing, ZHAO Hongbin, SIMA Wenxia, et al. Identification method of grid measured over-voltage based on threshold judgment and support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3188-3198.

[104] 段建东，张保会，郝治国，等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. 电力系统自动化，2004，28(18)：30-35.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Identification of lightning and fault in ehv transmission line transient-based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 30-35.

[105] 文习山，彭向阳，解广润. 架空配电线路感应雷过电压的数值计算[J]. 中国电机工程学报，1998，18(4)：299-301.
WEN Xishan, PENG Xiangyang, XIE Guangrun. Numerical calculation of lightning induced voltages on overhead distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 299-301.

[106] 李　鑫，彭向阳，钱冠军. 输电线路感应雷与直击雷的辨识方法研究[J]. 广东电力，2012，25(2)：50-56.
LI Xin, PENG Xiangyang, QIAN Guanjun. Research on method for identifying induction lightning and direct lightning flash on transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(2): 50-56.

[107] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京：水利电力出版社，1985.
XIE Guangrun. Overvoltage in power systems[M]. Beijing, China: Water Resources and Electric Power Press, 1985.

[108] 齐　冲. 高压输电线路雷电绕击、反击的识别[D]. 南宁：广西大学，2007.
QI Chong. The differentiation of lightning shielding failure and back flashover on high- voltage transmission line[D]. Nanning, China: Guangxi University, 2007.

[109] 束洪春，张广斌，孙士云，等. ±800 kV 直流输电线路雷电绕击与反击的识别方法[J]. 中国电机工程学报，2009，29(7)：13-19.
SHU Hongchun, ZHANG Guangbin, SUN Shiyun, et al. Identification of shielding failure and back striking in UHVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 13-19.

[110] 樊春雷. 重雷区域输电线路耐雷水平影响因素的研究[D]. 成都：西南交通大学，2009：29-35.
FAN Chunlei. Research on factors influencing lightning withstanding level of transmission line in heaviliy lightning areas[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2009: 29-35.

[111] 束洪春，王永治，程春和，等. ±800 kV 直流输电线路雷击电磁暂态分析与故障识别[J]. 中国电机工程学报，2008，28(19)：93-100.
SHU Hongchun, WANG Yongzhi, CHENG Chunhe, et al. Analysis of electromagnetic transient and fault detection on ±800 kV UI-IVDC transmission lines under lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 93-100.

[112] 司马文霞，谢　博，杨　庆，等. 特高压输电线路雷电过电压的分类识别方法[J]. 高电压技术，2010，36(2)：306-312.
SIMA Wenxia, XIE Bo, YANG Qing, et al. Identification of lightning over-voltage about UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 306-312.

[113] 杜　林，戴　斌，司马文霞，等. 架空输电线路雷电过电压识别[J]. 高电压技术，2010，36(3)：590-597.
DU Lin, DAI Bin, SIMA Wenxia, et al. Lightning overvoltage identification in overhead power transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 590-597.

[114] 杨　庆，王　荆，陈　林，等. 计及冲击电晕的输电线路雷电绕击和反击智能识别方法[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1149-1157.
YANG Qing, WANG Jing, CHEN Lin, et al. Identification method of back flash overvoltage and shielding failure of transmission lines considering the effect of impulse corona[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1149-1157.

[115] CHEN K J, HE Z Y, WANG S X, et al. Learning-based data analytics: moving towards transparent power grids[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(1): 67-82.

[116] CHEN K J, HUANG C W, HE J L. Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods[J]. High Voltage, 2016, 1(1): 25-33.

[117] CHEN K J, HU J, HE J L. A framework for automatically extracting overvoltage features based on sparse autoencoder[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 594-604.

[118] CHEN K J, HU J, HE J L. Detection and classification of transmission line faults based on unsupervised feature learning and convolutional sparse autoencoder[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1748-1758.

[119] FANG J S, CHEN K J, LIU C R, et al. An explainable and robust method for fault classification and location on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(10): 10182-10191.

[120] WANG J Q, HUANG Q J, MA Q M, et al. Classification of VLF/LF lightning signals using sensors and deep learning methods[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1030.

[121] GAO C, WANG J, ZHOU X, et al. Classification of lightning electric field waveform based on deep residual one-dimensional convolutional network[M]//MENG H Y, LEI T, LI M Z, et al. Advances in Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Cham, Germany: Springer, 2020: 1648-1659.

[122] 姚陈果，吴　昊，王　琪，等. 基于非接触式雷电流测量装置的新型线路分布式雷击故障定位方法[J]. 高电压技术，2014，40(9)：2894-2902.
YAO Chenguo, WU Hao, WANG Qi, et al. Novel distributed lightning fault location method for transmission line based on non-contact measurement device of lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2894-2902.

[123] 张怿宁，孟令军，王越杨. 基于非接触式行波采集的分布式高压直流故障测距方法[J]. 电网与清洁能源，2020，36(4)：55-59，65.
ZHANG Yining, MENG Lingjun, WANG Yueyang. A fault location method for distributed HVDC high resistance fault based on non-contact traveling wave collecting[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 55-59, 65.

[124] 马　仪，申　元，王　磊，等. 基于行波理论的输电线路雷击定位方法研究与应用[J]. 高电压技术，2014，40(5)：1382-1390.
MA Yi, SHEN Yuan, WANG Lei, et al. Lightning fault location method and its application for transmission line based on traveling wave method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1382-1390.

[125] 刘亚东，盛戈皞，王　葵，等. 输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J]. 高电压技术，2011，37(4)：923-929.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Kui, et al. Method and simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 923-929.
[126] DONG X Z, KONG W, CUI T. Fault classification and faulted-phase selection based on the initial Current traveling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 552-559.
[127] 席燕辉，胡　康，王　康. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的雷击故障定位[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(23)：30-39.
XI Yanhui, HU Kang, WANG Kang. Lightning strike fault location based on adaptive Kalman filter residual analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 30-39.
[128] HAGH M T, RAZI K, TAGHIZADEH H. Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network[C]//Proceedings of 2007 International Power Engineering Conference. Singapore: IEEE, 2008: 1109-1114.
[129] MORA N, RACHIDI F, RUBINSTEIN M. Locating lightning using time reversal of electromagnetic fields[C]//Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection. Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 1-6.
[130] KARAMI H, MOSTAJABI A, AZADIFAR M, et al. Locating lightning using electromagnetic time reversal: application of the minimum entropy criterion[C]//Proceedings of 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA). Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2019: 1-4.
[131] KARAMI H, AZADIFAR M, MOSTAJABI A, et al. Numerical and experimental validation of electromagnetic time reversal for geolocation of lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(5): 2156-2163.
[132] KARAMI H, MOSTAJABI A, AZADIFAR M, et al. Machine learning-based lightning localization algorithm using lightning-induced voltages on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(6): 2512-2519.
[133] LUGRIN G, MORA N, RACHIDI F, et al. On the use of the time reversal of electromagnetic fields to locate lightning discharges[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-4.
[134] WANG T, SHI L H, GUO F, et al. Lightning location with time reversal of electromagnetic fields technique[C]//Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM). Hangzhou, China: IEEE, 2015: 394-397.
[135] YANG Q, YIN L, LIU H W, et al. Measurement of lightning-induced overvoltage in power distribution lines using ceramic-capacitor insulator[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3): 788-795.
[136] MORA N, RACHIDI F, RUBINSTEIN M. Application of the time reversal of electromagnetic fields to locate lightning discharges[J]. Atmospheric Research, 2012, 117: 78-85.



杨　庆
1981—，男，博士，教授，博导
主要从事电力传感及设备在线监测、电力系统过电压及其绝缘配合和复杂环境下输电线路外绝缘特性及放电机理方面的研究工作
E-mail: yangqing@cqu.edu.cn

YANG Qing
Ph.D., Professor



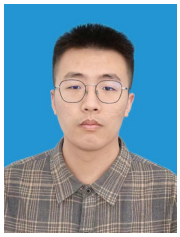
柯　锟
1995—，男，博士生
主要从事先进电力传感及设备在线监测方向研究
E-mail: kunke@stu.cqu.edu.cn

KE Kun
Ph.D. candidate



胡　军
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事新型电介质材料、微型传感器件方向的研究
E-mail: hjun@tsinghua.edu.cn

HU Jun
Ph.D., Professor



姚子恒
1997—，男，博士生
主要从事先进电力传感器及敏感材料方向的研究
E-mail: Yaoziheng12@163.com

YAO Ziheng
Ph.D. candidate



吴世林
1992—，男，博士，助理研究员
研究方向为先进电介质界面性能分析与调控、电场电荷测量
E-mail: wushilin@tsinghua.edu.cn

WU Shilin
Ph.D.



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

HE Jinliang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-06-03　修回日期　2024-06-18　　编辑　卫李静