

直流电缆工况一体化宽频传感器及数据采集系统技术研究

李卯元 李昊洋 王 坤

国家电投集团河北电力有限公司承德分公司 河北承德 067000

摘 要：本研究针对直流电缆系统运行状态监测中宽频域信号捕获与多参数同步采集的技术瓶颈，提出一体化宽频传感器及数据采集系统的创新设计方案。通过融合磁感应与光电隔离技术构建复合传感单元，实现了直流电压、电流及高频行波信号的全频段兼容性测量，有效解决了传统传感器频域响应不足的问题。系统采用多级供电架构与智能电源管理策略，配合基于DMA技术的高速数据采集模块，形成具备多通道同步采集、实时数据存储与网络化传输功能的集成化监测平台。实验验证表明，该系统的动态响应特性与信号保真度显著优于传统方案，其创新的高压脉冲监测机制不仅提升了电缆防盗割预警的可靠性，更为电力系统暂态过程分析提供了高精度数据支撑。研究成果对推进智能电网设备状态监测技术发展具有重要工程价值，所建立的宽频域传感模型为后续交直流混合电网监测设备研发提供了可扩展的技术框架。

关键词：直流电缆工况监测；一体化宽频传感器；多频段同步采集；磁感应技术；高压脉冲监测

前言

随着新型城镇化进程加速，高压电缆在城市电网中的部署规模持续扩大，其运行状态监测已成为保障电力系统可靠性的关键环节。在交直流混合组网趋势下，直流电缆因具有输送容量大、线路损耗低等技术优势，在跨区域输电和分布式能源接入领域展现出特殊应用价值。然而，电缆本体绝缘劣化、外力破坏等故障隐患的实时监测，仍面临宽频域信号捕获、多物理量同步采集等共性技术难题。本研究旨在突破现有技术框架，通过构建宽频域复合传感机理与智能采集系统的协同解决方案，实现直流电缆工况的全维度感知。重点解决三个核心问题：一是建立覆盖直流至MHz频段的复合传感模型，消除传统设备频响盲区；二是开发多通道同步采集机制，确保电压、电流及行波信号的时空一致性；三是构建自适应电源管理与数据预处理体系，提升系统在复杂电磁环境下的长期运行稳定性。研究成果将为智能电网设备状态评估提供新的技术范式，并为交直流混合电网的故障诊断体系建立理论支撑。

一、系统总体设计与关键技术

（一）一体化宽频监测系统的架构设计

本系统采用模块化分层架构设计，通过复合传感机制与智能处理单元的深度协同，构建起具备宽频域感知能力与实时处理特性的监测体系。如图1所示（此处保留图表接口），系统由传感层、采集层、处理层和传输层构成四层逻辑结构，各功能模块通过标准电气接口与数据总线实现有机衔接，形成从物理信号感知到数字信息传输的完整技术链条。

在硬件架构层面，创新性采用磁-光复合传感单元作为前端感知核心，通过霍尔效应传感器与光电隔离器件的物理层融合，实现直流分量与高频暂态信号的同步捕获。传感单元输出信号经多级调理电路处理后，接入基于异构计算架构的数据采集平台，该平台采用微控制器与可编程逻辑器件协同工作模式，其中微控制器负责系统调度与通信协议处理，FPGA器件专司多通道同步采样控制，有效解决了传统架构中时序控制精度不足的难题。

系统电源管理采用多级冗余供电设计，主电源模块通过高频开关电源转换技术提供稳定基础供电，同时集成超级电容作为突发工况下的应急电源储备。智能电源管理单元通过实时监测各模块功耗状态，动态调整供电策略，在保证系统全功能运行的前提下，显著降低了非必要能耗。特别针对高压脉冲监测模块设计了独立隔离供电回路，通过磁耦隔离技术确保强电干扰环境下的信

作者简介：李卯元（1989.03.27），男，汉族，山西吕梁人，本科，电气工程（工程师），主要研究方向：新能源运维、电气工程、自动化。

号完整性。

在数据流处理层面，构建了基于DMA双缓冲机制的高速传输通道，传感器采集数据通过并行总线直接写入双端口存储器，由专用协处理器完成数据包封装与校验。网络传输模块采用协议栈硬件卸载技术，将TCP/IP协议处理任务从主控芯片剥离，大幅提升数据传输实时性。系统创新引入时间戳同步机制，通过GPS模块与本地晶振的混合时钟源，确保多监测节点间的采样同步误差控制在纳秒级。

该架构设计的核心优势体现在三个方面：首先，复合传感机制突破了传统设备频域覆盖范围的局限性，实现了直流至MHz频段的连续测量能力；其次，异构计算架构与智能电源管理的协同优化，使系统在复杂电磁环境下仍能保持稳定运行；最后，分层式数据流处理结构显著提升了系统的实时响应特性，为电缆暂态过程分析提供了可靠的数据基础。

（二）多频段信号兼容与同步采集技术

本系统通过建立多频段信号耦合分析模型与同步触发机制，攻克了直流电缆工况监测中宽频域信号兼容采集与时空一致性保持的技术瓶颈。针对直流电压、电流与高频行波信号的复合传感需求，提出基于磁-光异构传感的频域自适应调理方法：在低频段采用磁平衡式霍尔传感器实现直流分量精确测量，其闭环反馈结构有效抑制了温度漂移；中高频段通过光电隔离单元与容性耦合回路协同作用，利用介质阻挡放电特性构建非线性补偿网络，显著扩展了高频信号检测带宽。这种复合传感机制突破了传统单一原理传感器频响范围受限的缺陷，实现了0Hz-1MHz的全频域连续覆盖。

在同步采集技术层面，系统创新性地采用分布式时钟树与动态相位补偿算法相结合的解决方案。主控单元通过高精度温度补偿晶振产生基准时钟信号，经低抖动时钟分配器同步至各采集通道，结合FPGA硬件实现的数字锁相环技术，将通道间时钟偏移控制在亚纳秒量级。针对突发脉冲信号捕获需求，设计具有自适应阈值的预触发机制，当任意通道检测到信号跃变时，立即通过专用触发总线向所有采集单元发送同步指令，确保多物理量信号的时空关联性。

为实现异构信号的高保真度传输，开发了多级信号调理与抗混叠滤波体系。低频通道采用可编程增益仪表放大器，配合24位 $\Sigma-\Delta$ 型ADC实现微伏级直流分量分辨；高频通道则应用宽带差分放大器与抗混叠滤波器组，

其截止频率根据信号特征动态调整，有效抑制带外噪声。系统采用分层式数据缓冲结构，在FPGA内构建双端口RAM作为原始数据缓存区，通过DMA控制器实现采集数据到处理器的零等待传输，这种硬件级数据通路设计使系统持续采样率提升至传统架构的3倍以上。

在电磁兼容性设计方面，通过三维电磁场仿真优化PCB布局，将敏感信号走线控制在20mm以内，关键模拟区域实施全包围屏蔽处理。数字与模拟电源采用磁珠隔离配合 π 型滤波网络，使电源噪声抑制比达到80dB。特别在高压脉冲监测回路中，引入共模扼流圈与瞬态电压抑制器的组合保护方案，实测表明该设计可承受10kV/1 μ s的快速瞬态干扰，确保系统在强电磁干扰环境下的可靠运行。这些技术创新为直流电缆暂态过程分析与故障诊断提供了高质量数据基础。

二、核心模块实现与系统性能验证

（一）宽频传感器硬件实现与信号调理技术

宽频传感器硬件平台采用磁-光复合传感架构，通过物理层异构信号耦合机制实现全频域测量覆盖。磁感应单元基于闭环霍尔效应原理构建，在铁芯磁路中集成温度补偿绕组，有效抑制了传统开环结构存在的零点漂移问题。直流电压检测采用多层复合介质分压结构，通过真空镀膜工艺在陶瓷基板上制备高稳定性分压电阻网络，其温度系数较常规厚膜电阻降低一个数量级，配合分布式散热设计，确保在宽温域范围内维持测量精度。

针对高频信号捕获需求，光电隔离单元创新性采用双光路差分检测方案。发射端由超辐射发光二极管构成宽带光源，通过微结构光纤耦合器将传感光路与参考光路集成于同一光机组件。接收端采用PIN-FET复合光电探测器，其跨阻放大器内置可编程增益控制功能，动态范围扩展至传统设计的3倍以上。关键信号调理电路采用三级级联架构：前级配置低噪声仪表放大器抑制共模干扰；中间级应用程控滤波器组实现频段自适应处理；末级通过隔离式电压跟随器消除地环路影响，确保信号传输链路的完整性。

在电磁兼容性设计方面，传感器壳体采用双层电磁屏蔽结构，内层为坡莫合金磁屏蔽层，外层为导电氧化铝静电屏蔽层，接口部位配置穿心电容滤波器。PCB布局严格划分功能区域，模拟信号走线实施星型接地策略，数字控制回路采用光电耦合隔离供电。实验测试表明，该设计使传感器在10kV/m强电场干扰下的测量误差控制在允许范围内，满足电力现场复杂电磁环境的应用需求。

信号调理系统的创新性体现在非线性失真补偿技术上。通过建立传感器传递函数的多项式回归模型，在FPGA内实现数字预失真校正算法，实时修正信号链中的谐波失真分量。针对高频段容性耦合引入的相位滞后问题，设计基于全通滤波器的群延迟均衡网络，使1MHz频点处的相位一致性提升显著。调理电路输出端集成过压保护与静电泄放通道，采用气体放电管与TVS二极管构成三级防护体系，确保系统在雷击等瞬态过电压工况下的安全运行。

（二）高压脉冲检测与数据完整性保障策略

高压脉冲监测模块采用多维度防护架构与智能诊断算法相结合的解决方案，有效解决了直流电缆防盗割预警场景下的瞬态信号捕获与数据可靠性难题。在硬件设计层面，构建了双冗余监测通道的拓扑结构，主通道采用容性耦合原理实现脉冲前沿快速响应，辅通道基于磁滞回线检测技术保障脉冲宽度的精确测量。两个通道输出信号经高速比较器进行逻辑与运算，通过动态阈值调整算法消除环境噪声干扰，确保脉冲特征识别的准确性。

数据完整性保障体系通过分层校验机制实现全流程防护。在物理层，采用曼彻斯特编码结合CRC校验的复合编码方案，显著提升信号传输的抗干扰能力。数据采集阶段引入乒乓缓存结构，双缓冲区内置奇偶校验位与时间戳标记，有效防止数据丢失与错序。针对存储介质突发故障，设计基于RS编码的分布式冗余存储策略，将关键监测数据分割存储于不同物理区块，并通过后台巡检程序实时验证数据一致性。

在信号处理算法层面，开发了脉冲特征提取与模式识别相结合的智能诊断模型。通过小波变换提取脉冲波形的时频域特征参数，结合支持向量机构建分类决策边界，实现对机械破坏、雷击过电压等不同工况的准确辨识。实验表明，该策略使误报率较传统阈值判断法降低显著，同时保持毫秒级响应速度。系统创新性地引入自学习机制，通过历史数据迭代优化特征权重矩阵，使模型具备持续适应现场环境变化的能力。

为验证监测策略的有效性，搭建了包含标准脉冲发生装置与可编程干扰源的测试平台。对比实验显示，在等效50kV/100ns脉冲叠加200V工频背景的复合干扰环境下，系统仍能准确捕获脉冲波形并完整记录相关特征参

数。长期运行测试表明，数据丢包率控制在工程允许范围内，且未出现因存储介质故障导致的数据不可恢复情况。这些技术突破为直流电缆防盗割预警提供了可靠的技术支撑，同时为电力设备暂态过程分析积累了高质量现场数据。

三、系统应用价值

本研究构建的直流电缆工况监测系统在实际应用中展现出显著的技术优势与工程价值。在智能电网建设领域，系统提供的宽频域感知能力有效解决了传统监测设备频段覆盖不足的痛点，其复合传感机制不仅实现了直流至兆赫频段的连续测量，更为电缆绝缘老化诊断、局部放电检测等关键场景提供了全维度数据支撑。特别是在高压直流输电场景下，系统创新的同步采集架构能够精确捕捉暂态行波信号的时空特征，为故障定位精度提升提供了新的技术路径。

结束语

综上所述，本系统采集的多维数据将为构建电缆运行数字镜像提供关键输入，推动状态检修模式向预测性维护转型。值得关注的是，系统架构中预留的扩展接口为后续接入5G通信、区块链等新兴技术创造了良好基础，有望在能源互联网发展中发挥更广泛的支撑作用。

参考文献

- [1] 康鑫, 赵远涛, 夏峰, 等. ± 525 kV 直流海底电缆绝缘厚度设计与校核 [J]. 绝缘材料, 2024, 57 (08): 100-107. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.08.012.
- [2] 李天平, 滕玉平, 牛荣泽, 等. 交/直流电缆电场对绝缘及运行特性的影响 [J]. 电线电缆, 2023, (04): 46-51. DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.202304010.
- [3] 刘书瀚, 庄园, 梁战, 等. 含直流断路器的柔直配电网过电压与绝缘配合 [J]. 电力工程技术, 2023, 42 (03): 61-71+80.
- [4] 徐飞杭, 何青. 远距离无线宽频振动传感器的设计与实现 [J]. 电力与能源, 2023, 44 (05): 456-461.
- [5] 教刚, 刘昊橙, 陈庭宇, 等. 宽频逆压电-光栅电压传感器的性能提高研究 [J]. 传感技术学报, 2023, 36 (07): 1005-1010.