

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0083-04

# 基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术

张晓东<sup>1</sup>, 施学昭<sup>1</sup>, 赵志健<sup>1</sup>, 史晨昱<sup>2</sup>, 李沛霖<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司周口供电公司, 河南 周口 466000; 2. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 配电线路运行环境较为复杂, 影响数据测量精度, 导致状态感知精度较低。为此, 提出基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术研究。利用电子式传感器采集配电线路运行实时数据, 基于采集数据对配电线路的热辐射参数、电流幅值、输出电压降以及湿度参数进行多维融合分析。引入正影响因子系数建立配电线路运行状态因果关联矩阵。在此基础上, 通过熵函数转换得到矢量参数, 结合雅克比矩阵进行残差计算, 从而得到状态感知结果。测试结果表明, 所提技术能够得到较高精度的状态感知结果, 满足配电线路运维监测的实际需求。

**关键词:** 配电线路; 状态感知; 线路状态; 电子式传感器; 融合感知

中图分类号: TP212.4<sup>+</sup>3; TN75

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)01-0083-04

## State fusion perception technology of distribution lines based on electronic sensors

ZHANG Xiaodong<sup>1</sup>, SHI Xuezhao<sup>1</sup>, ZHAO Zhijian<sup>1</sup>, SHI Chenyu<sup>2</sup>, LI Peilin<sup>1</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Company Zhoukou Power Supply Company, Zhoukou 466000, Henan, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, Henan, China)

**Abstract:** Due to the complex operating environment of distribution lines, the accuracy of data measurement is affected, resulting in lower state perception accuracy. Therefore, a research on the fusion sensing technology of distribution line status based on electronic sensors is proposed. Using electronic sensors to collect real-time data on the operation of distribution lines, and based on the collected data, conducting multidimensional fusion analysis on the thermal radiation parameters, current amplitude, output voltage drop, and humidity parameters of the distribution lines. It introduces positive impact factor coefficients to establish a causal relationship matrix for the operational status of distribution lines. On this basis, vector parameters are obtained through entropy function transformation, and residual calculation is performed using Jacobian matrix to obtain state perception results. The test results indicate that the proposed technology can obtain high-precision state perception results, meeting the practical needs of distribution line operation and maintenance monitoring.

**Keywords:** distribution lines; state perception; line status; electronic sensors; fusion perception

在电力系统的复杂网络中, 配电线路的实时状态对电力系统的稳定运行有着很大影响。精准的状态感知能够实现配电线路的全方位、持续性监测, 迅速捕捉并解析电流、电压等关键参数的细微波动与异常变化, 从而预防大规模停电事故、保障供电连续性。基于这一重要意义, 很多研究人员提出了配电线路状态感知方法。

国内程江洲等<sup>[1]</sup>根据配电线路的最优潮流分析节点和线路的负荷重要度。结合配电线路运行的电气量参数, 在 LeaderRank 算法中分析线路的负荷矩, 从而得到相应状态感知结果。但配电线路节点线路众多且关联复杂, 全面评估需考虑电气参数、地理位置等多因素, 复杂性提升感知难度, 易致感知误差。吴阳等<sup>[2]</sup>基于配电线路运行的

磁屏蔽原理, 提取线路中的共模漏电流。结合传感技术的应用, 对线路状态进行监测分析, 从而实现线路状态感知。但漏电流的测量精度易受到环境因素的影响, 导致测量数据产生偏差, 影响状态感知的准确性。陈晓娟等<sup>[3]</sup>选取衡量配电线路状态的温度、湿度等评价指标, 构建状态感知的隶属度关系矩阵。基于此, 通过计算综合权重, 得到状态感知结果。但配电线路状态是动态变化的, 而隶属度函数评估方式为静态, 难以适应变化, 导致感知结果滞后。国外 Xue 等<sup>[4]</sup>采用多层网络结构分析终端状态。Q-强化学习网络优化卷积神经网络, 防止过拟合问题, 连续提取数据特征, 并在模型中引入隶属函数优化, 确保状态分析精准。但深度强化学习模型的复杂性和计算资源需求可

收稿日期: 2024-08-07; 录用日期: 2024-08-28

基金项目: 国网河南省电力应用研究类项目(5217F0230002)

作者简介: 张晓东(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 供用电技术管理、电网发展规划、设计。

引用本文: 张晓东, 施学昭, 赵志健, 等. 基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 83-85, 101. (ZHANG Xiaodong, SHI Xuezhao, ZHAO Zhijian, et al. State fusion perception technology of distribution lines based on electronic sensors[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 83-85, 101.)

能限制其实时性和响应速度。

为解决上述方法存在的问题,本研究提出基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术。

## 1 融合感知技术设计

### 1.1 监测数据融合分析

采用多个电子式传感器采集线路实时数据,并分别对各类型的传感器数据进行分析。根据电子式温度传感器的采集数据分析配电线路的热辐射参数。计算对应温度下的配电线路导体电阻为<sup>[5]</sup>

$$R_t = K \frac{\bar{\omega}_1 T_t}{S} \quad (1)$$

式中,  $R_t$  为  $t$  时刻下的配电线路导体电阻,  $T_t$  为相应时刻下的电子式传感器采集的温度数据值,  $S$  为配电线路导体的横截面积,  $K$  为集肤效应系数,  $\bar{\omega}_1$  为配电线路导体材料的电阻率。

基于温度的传热原理,构建配电线路热传导方程。该方程的表达式<sup>[6-7]</sup>为

$$\rho_r C \frac{\partial T_t}{\partial t} = \lambda_r \nabla^2 T + Q \quad (2)$$

式中,  $C$  为配电线路的定压比热容,  $T$  为绝对温度,  $\rho_r$  为绝对温度下的线路导体材料密度,  $\lambda_r$  为相应的导体导热系数,  $Q$  为热损耗。

在考虑风速的影响下,根据 Stefan-Boltzmann 定律分析配电线路的热辐射参数。计算方法为

$$\beta_t = \frac{\sigma(T_t - T_0)}{\frac{1}{\varepsilon} + Q} \quad (3)$$

式中,  $\beta_t$  为  $t$  时刻的配电线路热辐射参数,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T_0$  为空气域绝对温度,  $\varepsilon$  为导体外表面发射率。

根据电子式电流传感器的实时采集数据分析配电线路运行的电流幅值参数。根据该传感器的工作原理,定义配电线路电流的数学表达式<sup>[8]</sup>为

$$i(t) = \frac{U}{\sqrt{1-\alpha^2}} \exp\left(-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}\right) \sin \frac{t\sqrt{1-\alpha^2}}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

式中,  $i(t)$  为  $t$  时刻的配电线路电流表达式,  $U$  为电压值,  $\alpha$  为非振荡波临界值,  $L$  为配电线路电感。

通过式(4)的变换,得到配电线路电流到达第一个幅值的时间为

$$t_1 = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\alpha^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} \quad (5)$$

式中,  $t_1$  为电流到达第一个幅值的时间。

基于此,计算配电线路的电流幅值参数,计算公式为

$$I_t = U \sqrt{\frac{L}{C}} \exp\left(-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}\right) \quad (6)$$

式中,  $I_t$  为电流幅值参数。

根据电子式电压传感器的实时采集数据分析配电线路运行的输出电压降参数。基于高斯定理计算配电线路中的电荷量<sup>[9-10]</sup>为

$$q_t = \int_A \varepsilon E(R_t, t) dA \quad (7)$$

式中,  $q_t$  为  $t$  时刻的配电线路电荷量,  $E$  为电场强度,  $dA$  为高斯微元。

对式(7)中的时间参数进行微分,由此计算出配电线路的输出电压降为

$$V_t = R_t \int_A \varepsilon \frac{dE(R_t, t)}{dt} dA \quad (8)$$

式中,  $V_t$  为输出电压降。

通过上述参数计算,结合配电线路中的湿度传感器的采集数据,构建多维度数据的融合矩阵<sup>[11]</sup>为

$$B = \begin{bmatrix} \beta_t & I_t \\ I_t & h_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $B$  为配电线路的传感器多维数据融合矩阵。

综上,完成传感器监测数据融合分析过程。

### 1.2 建立配电线路运行状态因果关联矩阵

基于上述分析的配电线路多维数据,本研究根据参数数据与线路状态之间的因果关系,构建配电线路运行状态的因果关联矩阵。

将配电线路电子式传感器的多维数据融合矩阵转换为二维矩阵的形式,即

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由此构建相应的满秩矩阵为

$$G = \gamma [B]^t \quad (11)$$

式中,  $G$  为满秩矩阵,  $\gamma$  为正影响因子系数。

其中,  $\gamma$  的定义为<sup>[12]</sup>

$$\gamma = \frac{p(s_t)}{\sum_{s_0=1}^N p(s_0)} \quad (12)$$

式中,  $s_t$  为配电线路的状态,  $p(s_t)$  为处于这一状态的概率,  $s_0$  为配电线路的标准运行状态,  $N$  为状态感知的划分区段数。

基于此,建立配电线路运行状态因果关联矩阵,表达式为

$$F = W^{-1}G \quad (13)$$

式中,  $F$  为因果关联矩阵,  $W$  为概率向量。

综上,完成配电线路运行状态因果关联矩阵建立。

### 1.3 配电线路状态量感知计算

将融合的电子式传感器数据作为残差矢量,本研究在构建的因果关联矩阵的基础上,采用残差计算的方法对配

电线路的状态量进行量化感知。

电子式传感器多维数据融合矩阵元素的矢量化转换方法为<sup>[13-14]</sup>

$$z = H(x) + v \tag{14}$$

式中,  $z$  为转化的数据矢量值,  $x$  为融合矩阵元素,  $H$  为熵函数,  $v$  为电子式传感器的测量误差项。

将式(14)计算得到的结果进行线性化处理,并在数据的欧氏空间中建立相应的雅克比矩阵,其表达式为

$$J = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中,  $J$  为  $m \times n$  阶的雅克比矩阵。

则残差矢量的定义为<sup>[15]</sup>

$$\bar{x} = J(z) [Y(x)^{-1}] v \tag{16}$$

式中,  $\bar{x}$  为残差矢量,  $Y(x)$  为数据测量值残差方程。

根据这一残差矢量,结合上述建立的因果关联矩阵,对配电线路的状态量进行残差计算。具体的计算方法为

$$\mu_t = \left( \frac{\sqrt{D^{-1}W}}{F(\bar{x})} \right)^\varphi \tag{17}$$

式中,  $\mu_t$  为  $t$  时刻的配电线路状态量,  $D$  为残差敏感矩阵,  $\varphi$  为状态量维数。

通过上述计算,得到对配电线路状态的感知结果。至此,完成基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术的设计。

## 2 技术应用分析

### 2.1 测试环境

对本文所设计的配电线路状态感知技术进行实践应用测试分析。基于该技术的应用需求,选用电子式温度传感器、湿度传感器、电流传感器、电压传感器,采集配电线路的实时运行数据,以此实现本文技术的实践应用。本次技术应用测试的对象为某配电系统的中间线路段。公用线路总长为 255 km,架空段总长 1 365 km。在每个变压器节点处安装选用的电子式传感器。根据该配电系统的初始设计状态,开展本次配电线路状态感知的实践测试。

### 2.2 状态感知分析

在上述测试环境中,采用本文技术对配电线路的状态进行感知分析。对电子式传感器采集的数据信息进行分析计算,得到如图 1 所示。

基于如图 1 所示的数据计算结果进行后续的分析,得到最终的状态感知结果如图 2 所示。

由图 2 可知,在本次测试中,本文技术感知所得的配电线路状态呈现出先上升后降低的下降趋势,说明在该时间段内,配电线路的状态随着时间的变化可能会出现温度升高、电流值波动等问题,对其状态造成了一定的影响。结合该时间段内配电线路的实际状态分析可知,本文技术的应

用结果与实际的状态量基本一致,具备一定的可行性。

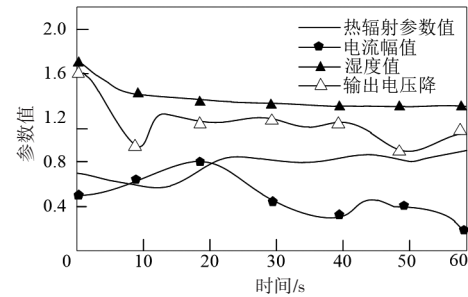


图 1 电子式传感器数据

Fig. 1 Electronic sensor data

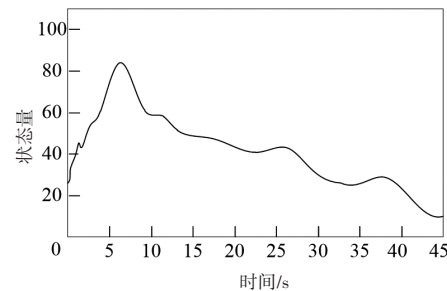


图 2 配电线路状态感知

Fig. 2 Power distribution line condition monitoring

### 2.3 感知精度对比

考虑到配电线路的运维需求,采用对比分析的方法对本文技术的状态感知准确度进行对比分析,以此验证本文技术的实践应用性能。

分别以基于节点-线路重要度的配电线路状态感知方法作为方法 1、基于漏电流测量的配电线路状态感知方法作为方法 2 以及基于隶属度函数的配电线路状态感知方法作为方法 3。通过计算各方法感知状态量与配电线路实际状态量之间的差异度量,分析各方法的感知精度。

经过测试,得到不同方法下的配电线路状态感知差异度量结果如图 3 所示。

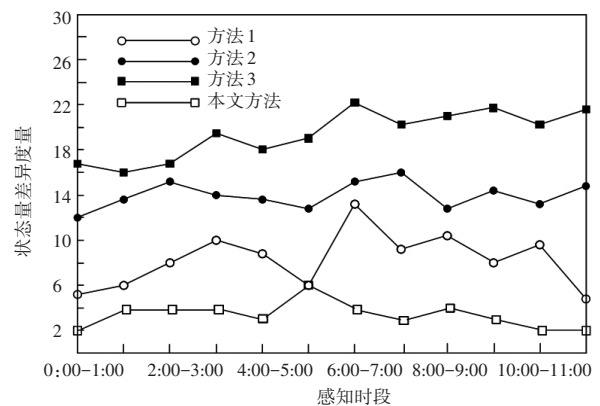


图 3 感知精度对比

Fig. 3 Perception accuracy comparison

将本次对比测试的配电线路运行时间划分为 11 个时段,由此得到如图 3 所示的对比测试结果。基于这一结果分析可知,在各个时段中,本文技术的应用结果所表现出

(下转第 101 页)